

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NATHALIA HELOISA DULLIUS

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO LODO FLOTADO DE FRIGORÍFICOS: ESTUDO
DE ROTAS TECNOLÓGICAS E ANÁLISE PRELIMINAR DE VIABILIDADE
ECONÔMICA

PALOTINA

2025

NATHALIA HELOISA DULLIUS

VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO LODO FLOTADO DE FRIGORÍFICOS: ESTUDO
DE ROTAS TECNOLÓGICAS E ANÁLISE PRELIMINAR DE VIABILIDADE
ECONÔMICA

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin

PALOTINA
2025

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

D883 Dullius, Nathalia Heloisa

Valorização energética do lodo flotado de frigoríficos: estudo
de rotas tecnológicas e análise preliminar de viabilidade
econômica / Nathalia Heloisa Dullius. – Palotina, PR, 2025.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná,
Setor Palotina, PR, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia.
Orientador: Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin.

1. Biogás. 2. Cogeração. 3. Lodo flotado. I. Burin, Eduardo
Lucas Konrad. II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDU 620

Bibliotecária: Aparecida Pereira dos Santos – CRB 9/1653



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR PALOTINA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO BIOENERGIA - UEL -
UEM - UEPG - UNICENTRO - UNIOESTE - UFPR -
40002012041P8

TERMO DE APROVAÇÃO

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 **NATHALIA HELOISA DULLIUS**, intitulada: **VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DO LODO FLOTADO DE FRIGORÍFICOS: ESTUDO DE ROTAS TECNOLÓGICAS E ANÁLISE PRELIMINAR DE VIABILIDADE ECONÔMICA**, sob orientação do Prof. Dr. EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN, 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, 08 de Outubro de 2025.

Assinatura Eletrônica
09/10/2025 14:00:43.0
EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
09/10/2025 14:01:45.0
JOEL GUSTAVO TELEKEN
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
09/10/2025 21:52:32.0
KATIA CRISTINA FAGNANI
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DO OESTE DO PARANÁ)

Dedico este trabalho à minha família, que sempre esteve presente em minha trajetória, apoiando-me incondicionalmente e contribuindo de maneira fundamental para a realização dos meus sonhos e conquistas.

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão ao meu orientador, Dr. Eduardo Burin, pela constante orientação, incentivo e confiança ao longo desta jornada. Seus conselhos, ensinamentos e apoio foram fundamentais para a realização deste trabalho, contribuindo de maneira decisiva para meu crescimento acadêmico e pessoal.

À minha esposa, Mariana, minha vida, minha fortaleza nos instantes de dificuldade e luz nos momentos de incerteza. Sou profundamente grata por seu amor incansável, pelo apoio constante, pela delicadeza dos gestos e pela dedicação que transforma todos os dias em celebração à nossa felicidade. Seu carinho e companheirismo são o alicerce que sustenta meus sonhos e me inspira a seguir sempre adiante, mesmo diante das tempestades. Com você, cada conquista ganha novos sentidos e cada desafio é suavizado pelo afeto que compartilhamos.

Aos meus pais, Vitor e Sonia, meus irmãos Lucas e Gabriel e às minhas avós Lourdes e Olmira, registro meu mais profundo carinho e gratidão. O amor, os conselhos e o apoio incondicional que recebi de vocês ao longo da minha vida são o que me sustenta e impulsiona. Cada gesto de afeto, cada palavra de incentivo e cada abraço nos momentos difíceis se transformaram em pilares fundamentais para a construção dos meus sonhos. Vocês são minha base, minha inspiração e minha fortaleza. Sem vocês, nada seria possível, e por isso agradeço por estarem sempre ao meu lado, celebrando comigo cada conquista e acolhendo-me em cada desafio. Amo vocês imensamente.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR) - Setor Palotina e ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia.

Aos membros que compõem a banca pela atenção e disposição.

RESUMO

O presente trabalho investiga alternativas tecnológicas para a geração de energia a partir do lodo flotado, um subproduto do tratamento de efluentes da indústria de abate e processamento de carnes. O estudo é motivado pela crescente demanda energética do setor industrial brasileiro que em 2024 representou 31,8 % do consumo total de energia do país, e pela necessidade de soluções sustentáveis para a gestão de resíduos. Nesse cenário, o lodo flotado proveniente de sistemas de tratamento de efluentes apresenta-se como uma alternativa, permitindo sua conversão em fonte energética por meio de processos de combustão ou geração de biogás. Diante desse cenário, o presente estudo realiza simulações termodinâmicas para avaliar a demanda atual de cavaco utilizada na geração de vapor saturado em uma agroindústria e realiza comparações técnicas e de viabilidade econômica com três cenários alternativos: queima de biogás obtido por digestão anaeróbia do lodo em caldeira; utilização do biogás em motor de combustão interna para cogeração de eletricidade e vapor saturado e água quente; e co-combustão de lodo flotado centrifugado com cavaco de eucalipto em caldeira. Essas análises foram conduzidas com base em dados da literatura e do processo de uma agroindústria de abate de aves e peixes localizada no oeste do Paraná. Os resultados indicam que a queima de biogás em caldeira, apresentado no Cenário 1, embora reduza o consumo de cavaco em 20,7 %, revelou-se economicamente inviável devido ao alto investimento necessário e a perda da receita proveniente da comercialização de óleo, resultado de processo de centrifugação do lodo flotado, resultando em uma taxa interna de retorno TIR em - 25,70 % ao ano, ficando abaixo da taxa mínima de atratividade adotada (TMA) de 13,25 %. Cenário 2, o qual utiliza biogás em motor de combustão interna, apresentou desempenho financeiro expressivamente melhor, com VPL positivo de cerca de R\$ 14,7 milhões, TIR de 18,54 %, sendo um valor superior à taxa de desconto e payback descontado de apenas 8,66 anos. Já o Cenário 3, apresentou que a co-combustão de 20 % de lodo flotado e 80% de cavaco, em massa, é a alternativa mais vantajosa, em relação ao cenário atual, apresentando o maior valor presente líquido (VPL) e um payback praticamente imediato. Diante disso, concluiu-se que a valorização energética do lodo flotado não só contribui para a redução dos custos operacionais e para a melhoria da viabilidade econômica do processo industrial, mas também promove benefícios ambientais ao reduzir a quantidade de resíduos destinados ao tratamento convencional. Este trabalho apresenta soluções inovadoras e viáveis para a otimização do processo industrial, com potencial de aplicação em outras plantas industriais que enfrentam desafios semelhantes, e destaca a importância da continuidade das pesquisas para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis, alinhadas às demandas ambientais e econômicas da sociedade.

Palavras-chave: Lodo flotado; Valorização energética; Biogás; Cogeração; Co-combustão.

ABSTRACT

This work investigates technological alternatives for energy generation from floated sludge, a byproduct of wastewater treatment in the meat processing industry. The study is motivated by the growing energy demand of the Brazilian industrial sector, which represented 31.8 % of the country's total energy consumption in 2024, and by the need for sustainable waste management solutions. In this context, floated sludge from wastewater treatment systems presents itself as an alternative, allowing its conversion into an energy source through combustion processes or biogas generation. Given this scenario, the present study conducts thermodynamic simulations to evaluate the current demand for wood chips used in the generation of saturated steam an agro-industrial plant and performs technical and economic feasibility comparisons with three alternative scenarios: burning biogas obtained by anaerobic digestion of the sludge in a boiler; using biogas in an internal combustion engine for cogeneration of electricity and saturated steam and hot water; and co-combustion of centrifuged floated sludge with eucalyptus wood chips in a boiler. These analyses were conducted based on data from the literature and the agro-industrial process of a poultry and fish slaughtering unit located in western Paraná. The results indicate that the combustion of biogas in a boiler, presented in Scenario 1, although reducing wood chip consumption by 20.7%, proved to be economically unfeasible due to the high investment required and the loss of revenue from the sale of oil obtained from the centrifugation process of the floated sludge, resulting in an internal rate of return (IRR) of -25.70% per year, below the minimum attractiveness rate (MAR) of 13.25 %. Scenario 2, which uses biogas in an internal combustion engine, showed significantly better financial performance, with a positive net present value (NPV) of approximately R\$ 14.7 million, an IRR of 18.54 %, being a value higher than the discount rate, and a discounted payback of only 8.66 years. Scenario 3 showed that the co-combustion of 20% floated sludge and 80% wood chips, by mass, is the most advantageous alternative compared to the current scenario, presenting the highest net present value (NPV) and an almost immediate payback. Therefore, it was concluded that the energy valorization of floated sludge not only contributes to the reduction of operational costs and the improvement of the economic feasibility of the industrial process but also promotes environmental benefits by reducing the amount of waste destined for conventional treatment. This work presents innovative and viable solutions for the optimization of the industrial process, with potential application in other industrial plants facing similar challenges and highlights the importance of continuing research for the development of more efficient and sustainable technologies, aligned with the environmental and economic demands of society.

Keywords: Flotation sludge; Energy recovery; Biogas; Cogeneration; Co-combustion.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE DE ABATEDOURO DE AVES E PEIXES	22
FIGURA 2 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA	25
FIGURA 3 – MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COM COGERAÇÃO	32
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO GERADOR DE VAPOR	35
FIGURA 5 – DIAGRAMA DE FLUXO DE PROCESSO DO CENÁRIO BASE.....	36
FIGURA 6 – CONSUMO MÉDIO DIÁRIO DE ÁGUA QUENTE	39
FIGURA 7 – DIAGRAMA DE FLUXO DE PROCESSO DO CENÁRIO 1	46
FIGURA 8 – DIAGRAMA DE FLUXO DE PROCESSO DO CENÁRIO 2	48
FIGURA 9 – DIAGRAMA DE FLUXO DE PROCESSO DO CENÁRIO 3	52
FIGURA 10 – RESUMO DO FLUXO DE ENERGIA DO CENÁRIO BASE.....	61

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – PRINCIPAIS IMPUREZAS DO BIOGÁS E CONSEQUÊNCIAS 28

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERIZAÇÕES FÍSICO-QUÍMICA DO LODO DE FLOTADO	23
TABELA 2 – REAÇÕES METANOGÊNICAS E ENERGIA LIVRE DE GIBSS ΔG	27
TABELA 3 – RELAÇÃO ENTRE A UMIDADE E O PODER CALORÍFICO DO LODO FLOTADO	30
TABELA 4 – DADOS DE SÓLIDOS TOTAIS E RENDIMENTOS DE CONVERSÃO	43
TABELA 5 – CARACTERIZAÇÃO DO LODO FLOTADO CENTRIFUGADO	53
TABELA 6 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO DE VAPOR DO CENÁRIO BASE	59
TABELA 7 –RESULTADOS OBTIDOS PARA O SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA DO CENÁRIO BASE.....	60
TABELA 8 – CUSTOS E RECEITAS OBTIDOS NO TRATAMENTO DO LODO FLOTADO	61
TABELA 9 - BALANÇO GLOBAL DO CENÁRIO BASE.....	62
TABELA 10 – DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA E ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	63
TABELA 11 – COMPARAÇÃO DA REDUÇÃO DE CAVACO DO CENÁRIO 1	64
TABELA 12 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DO CENÁRIO 1.....	66
TABELA 13 – COMPARAÇÃO DA REDUÇÃO DE CAVACO DO CENÁRIO 2	67
TABELA 14 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DO CENÁRIO 2.....	68
TABELA 15 – ECONOMIA DE CAVACO NO CENÁRIO 3.....	69
TABELA 16 - BALANÇO GLOBAL DO CENÁRIO 3	71
TABELA 17 – SÍNTESE DOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DOS CENÁRIOS	73
TABELA 18 – INDICADORES ECONÔMICOS DOS CENÁRIOS AVALIADOS	74

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASME	- <i>American Society of Mechanical Engineers</i>
EES	- <i>Engineering Equation Solver</i>
MCI	- Motor de Combustão Interna
Mtep	- Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
NBR	- Norma Brasileira
PCI	- Poder Calorífico Inferior
PCS	- Poder Calorífico Superior
TMA	- Taxa Mínima de Atratividade
TIR	- Taxa Interna de Retorno
VPL	- Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 CENÁRIO ENERGÉTICO NACIONAL	19
2.2 EFLUENTES AGROINDUSTRIAS	20
2.3 LODO FLOTADO	21
2.4 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA.....	24
2.5 TRATAMENTO E PURIFICAÇÃO.....	27
2.6 ROTAS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS E DA QUEIMA DO LODO FLOTADO	28
2.6.1 Queima do biogás em caldeira	29
2.6.2 Co-combustão de lodo flotado e cavaco de eucalipto	29
2.6.3 Queima de biogás em motor de combustão interna	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1 CENÁRIO BASE	34
3.1.1 Geração de vapor e água quente	34
3.1.2 Sistema de tratamento de efluente.....	40
3.2 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	41
3.2.1 Dimensionamento do biodigestor	41
3.2.2 Estimativa de produção de biogás	42
3.3 CENÁRIOS ANALISADOS.....	43
3.3.1 Cenário 1: produção de biogás e queima em caldeira	45
3.3.2 Cenário 2: produção de biogás e queima em motor de combustão interna	47
3.3.3 Cenário 3: co-combustão lodo flotado centrifugado e cavaco de eucalipto.....	51
3.4 ANÁLISE PRELIMINAR DE VIABILIDADE ECONÔMICA	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1 CENÁRIO BASE	58
4.2 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR E ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....	62
4.3 CENÁRIO 1	64

4.4 CENÁRIO 2	66
4.5 CENÁRIO 3	69
4.6 ANÁLISE PRELIMINAR DE VIABILIDADE	72
5 CONCLUSÃO	77
REFERÊNCIAS.....	79
ANEXO 1 – DADOS REFERENTE AO TRIDECANTER UTILIZADO NA ANÁLISE	84
ANEXO 2 – DADOS DO MCI.....	85

1 INTRODUÇÃO

Em 2024, o setor industrial brasileiro respondeu por 31,8 % do consumo total de energia no país, registrando um acréscimo de 1,4 % em relação ao ano anterior. Nesse período, o consumo energético industrial alcançou 91,4 Mtep (milhões de toneladas equivalentes de petróleo), sendo 64,4 % provenientes de fontes renováveis, com destaque para o bagaço de cana-de-açúcar, que representou 21,3 % desse montante (EPE, 2025).

Esse cenário evidencia a crescente relevância de alternativas energéticas para a diversificação da matriz energética industrial. Adicionalmente, a sustentabilidade e a valorização de resíduos industriais como fontes renováveis têm se consolidado como estratégias eficazes para minimizar impactos ambientais e ampliar a eficiência energética.

Nesse contexto, o lodo flotado proveniente de sistemas de tratamento de efluentes apresenta-se como uma alternativa, permitindo sua conversão em fonte energética por meio de processos de combustão ou geração de biogás. Segundo Fagnani (2023), a digestão anaeróbia é considerada ambientalmente sustentável, promovendo tratamento eficiente de resíduos, autossuficiência energética e múltiplas possibilidades de uso do biogás, recomendando sua incorporação nos processos de recuperação de lodos.

Mantovan (2022) ressalta o potencial energético do lodo flotado para co-combustão com cavaco de eucalipto, condicionado ao atendimento das exigências da legislação brasileira vigente. A autora destaca que a queima desse resíduo em caldeiras só é permitida quando suas características estão em conformidade com os critérios estabelecidos pela Resolução SEMA nº 42/2008, que define limites máximos de metais pesados e restringe o teor de lodo na mistura a até 20% em base mássica.

Além disso, devem ser observadas as normas CONAMA nº 316/2002 e 382/2006, bem como a SEMA nº 16/2014, que regulamentam os limites de emissões atmosféricas de poluentes como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx) e dióxido de enxofre (SO₂). Mantovan (2022) enfatiza também a necessidade de caracterização físico-química prévia do lodo, incluindo teores de umidade, cinzas, elementos traço e metais pesados, além do monitoramento contínuo das emissões gasosas e da análise das cinzas geradas na combustão. Tais medidas asseguram que o processo ocorra de forma ambientalmente adequada e dentro dos padrões

legais, garantindo a viabilidade técnica e ambiental da co-combustão do lodo flotado com biomassa.

O setor industrial enfrenta desafios expressivos para suprir o aumento da demanda energética e gerenciar os volumes elevados de resíduos produzidos, além dos custos relacionados ao tratamento e destinação desses resíduos, como transporte e disposição final em aterros industriais. A valorização dos resíduos agroindustriais, nesse contexto pode representar uma alternativa sustentável para a produção de bioenergia (FAGNANI, 2023).

O aproveitamento do lodo flotado em operações industriais pode ocorrer por diversas rotas tecnológicas, cada qual com particularidades técnicas e econômicas. A seleção da opção mais adequada demanda análise criteriosa das condições operacionais, eficiência energética e custos envolvidos na implantação e operação. Portanto, este estudo tem como propósito a investigação das diferentes rotas tecnológicas aplicáveis à utilização do lodo flotado para geração de energia no setor agroindustrial, realizando comparações de eficácia e uma análise preliminar de viabilidade econômica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade técnica e econômica de três diferentes rotas tecnológicas para geração de energia (vapor, água quente e eletricidade) a partir do lodo flotado, resíduo gerado por meio do tratamento de efluentes em uma agroindústria de abate e processamento de carnes.

1.1.2 Objetivos específicos

- Levantar a demanda atual de cavaco de eucalipto na agroindústria, considerando a geração de vapor saturado e água quente, bem como os custos de tratamento e destinação do lodo flotado.
- Estimar o potencial de produção de biogás a partir do lodo flotado, com base em dados da literatura.

- Analisar três cenários de aproveitamento energético do lodo flotado, conforme critérios técnicos, energéticos e econômicos previamente definidos: queima simultânea de biogás e cavaco em caldeira; queima de biogás em motor de combustão interna para cogeração de vapor saturado, água quente e eletricidade; e a queima de uma mistura formada por cavaco de eucalipto e lodo flotado em caldeiras destinadas à geração de vapor saturado.
- Comparar os três cenários com o cenário atual da empresa, considerando eficiência térmica, redução do consumo de cavaco de eucalipto, custos operacionais e investimento necessário.
- Definir o cenário mais vantajoso para aplicação industrial, identificando a rota tecnológica de maior viabilidade econômica.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CENÁRIO ENERGÉTICO NACIONAL

No Brasil, durante o ano de 2024, o segmento industrial exerceu papel significativo no consumo de energia no país, representando 31,7 % do total de energia gerada e com um crescimento de 1,4% em relação ao ano anterior. Especificamente, o setor de alimentos e bebidas obteve uma queda de 2,1% em comparação com o mesmo período (EPE,2025).

Ao avaliar a composição energética do setor industrial brasileiro no ano de 2024, ela teve 64,4 % da sua matriz energética composta por fontes renováveis, o que corresponde a 58,8 Mtep. Desse total, há destaque para o bagaço de cana com 21,3 % o qual se deve à produção de açúcar associada ao setor de alimentos e bebidas e, ao licor negro que atingiu 9,0 % de participação em função do aumento da produção de celulose (EPE,2025).

É notável a alta demanda energética desse setor e a sua busca por fontes energéticas sustentáveis para compor sua matriz energética. Nesse cenário, o biogás e o lodo flotado surgem como alternativas para a produção sustentável de energia e essas fontes vêm se destacado no âmbito das soluções energéticas sustentáveis, por serem passíveis de substituição dos combustíveis fósseis e por não depender diretamente de condições climáticas.

O biogás, composto normalmente de 60 % a 65 % de metano (CH_4), 35 % a 40 % de dióxido de carbono (CO_2) e por outros constituintes minoritários, é produzido em biodigestores através da digestão anaeróbia de matéria orgânica, como dejetos de animais, resíduos agrícolas e efluentes industriais (ATELGE et al., (2020) AMARAL; STEINMETZ; KUNZ, 2022).

De acordo com a IRENA (2025), o biogás tem se consolidado como uma das principais alternativas dentro do setor de bioenergia, desempenhando papel estratégico na transição energética global. Em 2024, a capacidade instalada de bioenergia alcançou 151 GW, refletindo investimentos contínuos em biomassa e em projetos de aproveitamento energético de resíduos. Entre as tecnologias mais maduras e amplamente aplicadas destacam-se a combustão direta da biomassa e as plantas de biogás baseadas em digestão anaeróbia, que convertem resíduos orgânicos em energia renovável.

O biogás apresenta relevância e versatilidade nos setores agrícola e de gestão de resíduos, além de sua crescente integração em sistemas de aquecimento, cogeração e injeção em rede de gás natural por meio do biometano. Isso reforça sua importância não apenas como fonte energética renovável, mas também como ferramenta de valorização de resíduos e redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhando-se às tendências de inovação e sustentabilidade do setor.

Machado (2021), aponta que a destinação mais comum para o lodo flotado é o aterro industrial. Entretanto, essa alternativa apresenta limitações sob os aspectos técnico, financeiro e ambiental. Considerando critérios de sustentabilidade, o ideal seria promover o reaproveitamento desses resíduos, de modo a minimizar o passivo ambiental e contribuir para a preservação dos recursos naturais, tendo como uma alternativa sua combustão para geração de energia.

IRENA (2025), apresentou uma análise comparativa dos custos nivelados de energia (LCOE) da bioenergia em 5 países: China, França, Índia, Japão e Brasil e evidencia diferenças significativas no desempenho econômico da bioenergia entre países. Em 2024, o LCOE variou de USD 0,065 por kWh na Índia até USD 0,118 por kWh no Brasil. No Brasil, esse aumento está diretamente relacionado ao crescimento do custo total de investimento em capital (TIC), que subiu de USD 1.575 por kW em 2022 para USD 3.172 por kW em 2024, além da queda no fator de capacidade, que passou de 72 % para 66 %.

Esses dados mostram que, embora o Brasil disponha de grande potencial para a bioenergia, sua competitividade ainda é limitada por custos elevados e queda de eficiência, reforçando a necessidade de políticas de incentivo tecnológico e de gestão que possam alinhar o país ao cenário internacional.

2.2 EFLUENTES AGROINDUSTRIAS

Segundo a Associação Brasileira da Piscicultura (2024), o Brasil consolida-se como o 4^a maior produtor de tilápia do mundo. A produção de tilápia no Brasil em 2023 chegou a 579 mil toneladas, o que corresponde a 65,3 % de todo o cultivo de peixe. O estado do Paraná lidera o cultivo de tilápia no país com 209 mil toneladas, um crescimento de 11,5 % em relação ao ano anterior.

A indústria avícola é uma das principais geradoras de resíduos devido ao grande volume de frangos abatidos anualmente. De acordo com a Associação

Brasileira de Proteína Animal (2024), o Brasil destaca-se como um dos principais produtores de carne de frango mundo, ficando atrás somente dos Estados Unidos. Em 2023, a produção brasileira atingiu a marca de aproximadamente 14,833 milhões de toneladas dessa proteína e o estado do Paraná foi responsável por uma significativa fatia desse volume, correspondendo a 39,47 % do total produzido no país.

Segundo Fagnani (2023), os efluentes gerados pela indústria de processamento de aves contêm altos níveis de compostos orgânicos, nitrogênio e fósforo, além da presença de sangue, gordura, graxa e proteínas demandando um tratamento específico.

O tratamento de efluentes agroindustriais emerge como um tema de extrema relevância no cenário atual e as indústrias assumem um papel fundamental, uma vez que suas atividades geram uma quantidade significativa de efluentes que podem conter substâncias nocivas ao meio ambiente se descartados sem o devido tratamento.

Um efluente industrial com alto potencial energético é o lodo flotado, um dos subprodutos resultantes do sistema de tratamento de efluentes das indústrias de processamento de carne. Esse resíduo contém diversos materiais orgânicos provenientes do processo de abate dos animais e, quando submetido ao processo de combustão, pode ser utilizado para reduzir o consumo de combustíveis em geradores de vapor (MANTOVAN, 2022).

Uma opção com potencial para a agroindústria é a geração de biogás a partir do lodo flotado, seguida da sua conversão em calor e eletricidade para uso em processos industriais.

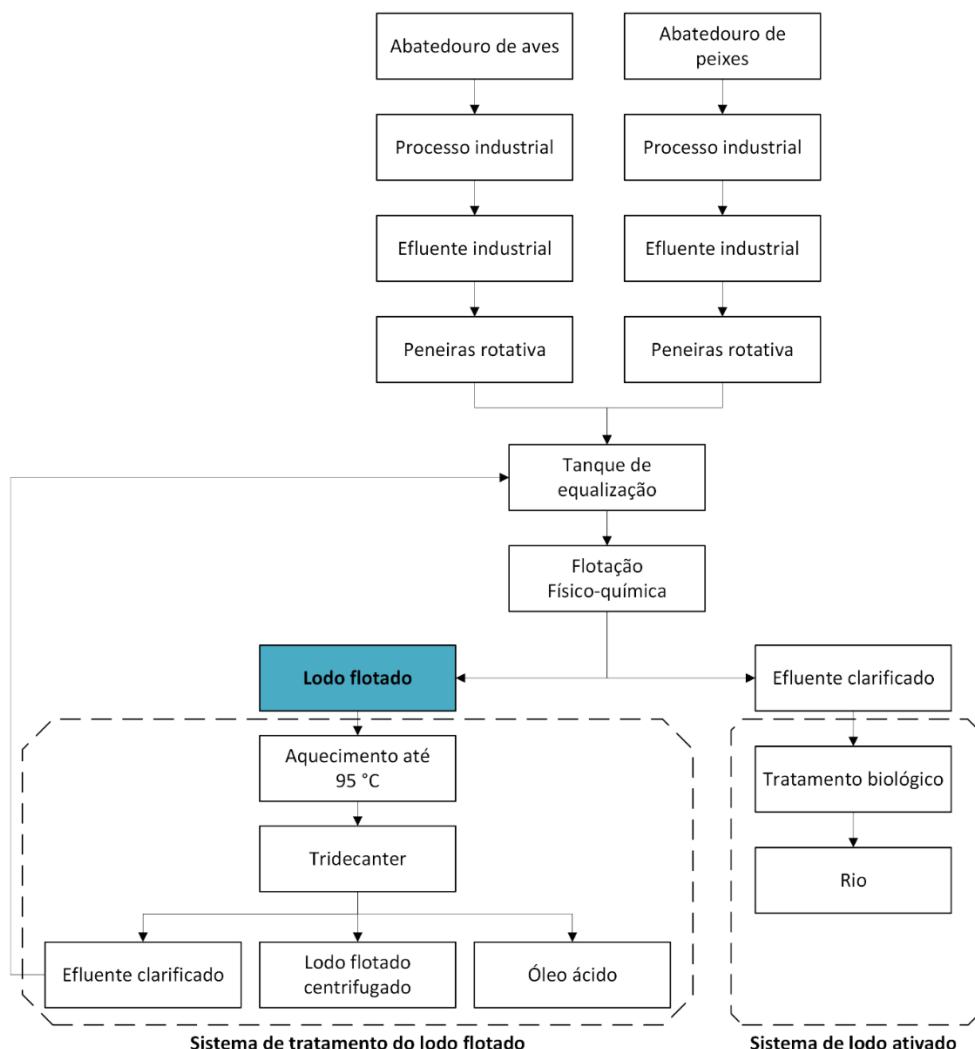
2.3 LODO FLOTADO

Lodo flotado é um tipo de resíduo sólido resultante de processos de tratamento de efluentes. Esse lodo é formado durante a etapa de flotação físico-química, um processo utilizado para separar sólidos suspensos e outras impurezas da água.

De acordo com Fagnani (2023), o maior volume de resíduo orgânico gerado em uma planta de abate e processamento de carne é o lodo gerado no sistema físico-químico por flotação. O tratamento empregado para esse resíduo é o seu cozimento a 95 °C, seguido de desidratação em tridecanter centrífugo, que gera um lodo com

aproximadamente 65% de umidade, óleo ácido e um efluente líquido que retorna para o tratamento de efluentes. Após o processo de desidratação, o lodo resultante é encaminhado para compostagem. Na FIGURA 1 são apresentadas as etapas do sistema de tratamento de efluentes do lodo flotado.

FIGURA 1 – PROCESSO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE DE ABATEDOURO DE AVES E PEIXES



FONTE: Adaptado de Fagnani (2023).

Legenda: O ponto destacado na cor azul refere-se ao resíduo de interesse nesse estudo.

Esse processo de tratamento enfrenta desafios como a demanda por locais licenciados para disposição e os custos associados à coleta e transporte do lodo. Algumas alternativas para melhorar a destinação desse resíduo vêm sendo pesquisadas como a queima em conjunto com cavaco em caldeiras (FAGNANI et al., 2019; MANTOVAN, 2022) e a produção de briquetes (KUNH, 2022).

Entretanto, essas alternativas ainda não são difundidas, diferentemente da biodigestão anaeróbia, que é um processo altamente eficiente para o tratamento de resíduos orgânicos, contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa e oferece diversas opções para a aplicação do biogás (FAGNANI, 2023).

Na TABELA 1, são apresentadas as caracterizações do lodo flotado e a geração de biogás, obtidas por meio de dados da literatura.

TABELA 1 – CARACTERIZAÇÕES FÍSICO-QUÍMICA DO LODO DE FLOTADO

Parâmetros	Restrepo, (2019)	Damaceno et al., (2019)	Fagnani, (2023)
pH	6,49	7,2	5,68
DQO _T (g.L ⁻¹)	NA	NA	82,60
DQO _s (g.L ⁻¹)	NA	NA	4,85
Sólidos totais (ST) (g.L ⁻¹)	40,19	44,4	51,64
Sólidos voláteis (SV) (g.L ⁻¹)	89,15	37,2	47,93
Sólidos voláteis removidos (SV _{rem}) (g.L ⁻¹)	NA	57,8	39,62
Sólidos fixos (SF) (g.L ⁻¹)	10,85	7,2	3,70
Carbono orgânico total (g.L ⁻¹)	55,51	20,7	4,18
Nitrogênio total Kjeldahl (g.L ⁻¹)	7,04	3,4	3,40
C:N	7,88	6,0	NA
Relação DQO/NTK	NA	NA	29,95
Rendimento (m ³ CH ₄ .kg ⁻¹ SV _{rem})	0,36	0,47	0,31
%CH ₄	70,3	72,8	62,28

FONTE: A autora (2025).

Legenda: NA: não apresentado; DQO_T: demanda química de oxigênio (total); DQO_s: demanda química de oxigênio (solúvel); ST: sólidos totais; SV: sólidos voláteis; SF: sólidos fixos; OG: óleos e graxas; COT: carbono orgânico total; NTK: nitrogênio total Kjeldahl.

Restrepo (2019) avaliou a codigestão de lodo flotado e caldo de cana-de-açúcar (CCA) obtendo que o volume ótimo de inserção de CCA foi o de 2%, uma vez que tanto sua produtividade quanto seu rendimento de metano foram os maiores dentre os tratamentos estudados, atingindo uma produção de biogás de 0,094 m³ por dia e rendimento de metano em 0,579 m³ CH₄/kg SV_{rem}. Ao avaliar apenas o tratamento de 100 % de lodo flotado, o autor obteve uma produção de biogás de 0,053 m³ por dia e rendimento de metano em 0,364 m³ CH₄/kg SV_{rem}. Restrepo (2019) indica que esse resultado possivelmente está relacionado às inserções de CCA, que auxiliaram na sinergia do meio reacional.

Damaceno et al. (2019) avaliaram a biodigestão de lodo flotado proveniente do abate de frangos, resultando em um potencial de produção de biogás de 0,65 m³ kg.SV⁻¹_{rem} e de metano de 0,48 m³ kg.SV⁻¹_{rem}. Além disso, ao investigar a codigestão

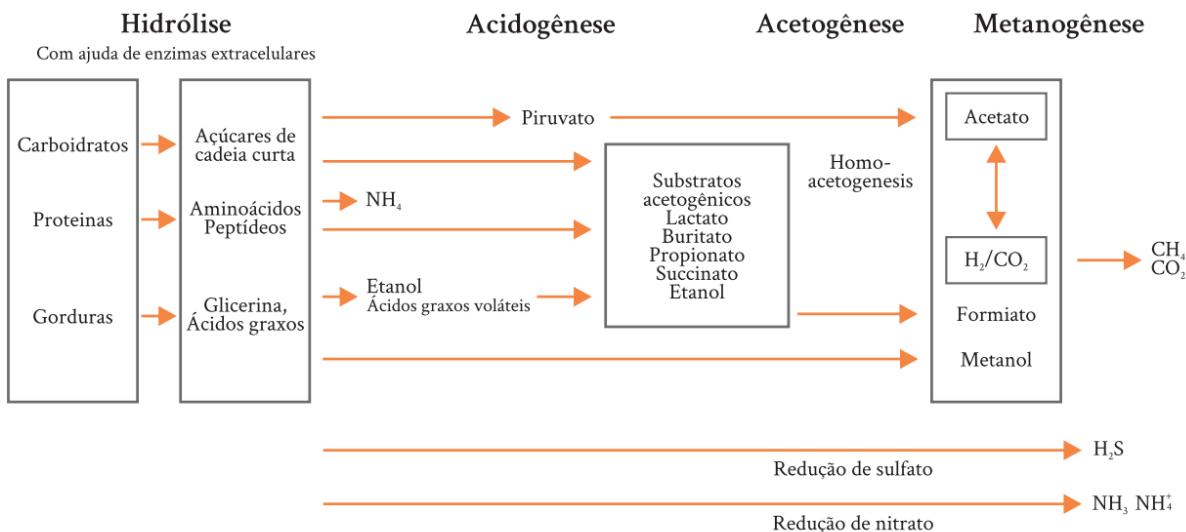
de 80 % de lodo flotado com 20 % de batata-doce, em massa, como suplemento de carbono, foram obtidos resultados ainda mais promissores, com um potencial de produção de biogás de $0,731 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ SV_{rem} e de metano $0,503 \text{ m}^3.\text{kg}^{-1}$ SV_{rem}, indicando que a codigestão com 20 % de batata-doce cria um ambiente otimizado para a atividade dos microrganismos anaeróbios, aumentando a eficiência do processo.

Fagnani (2023) avaliou a codigestão de lodo flotado e lodo ativado, dois subprodutos do tratamento de efluentes de indústria de abate e processamento de carne de aves e peixes. A autora avaliou a produção volumétrica de metano nos tratamentos com 70 %, 90 % e 100 % de lodo flotado, resultando em 513,67, 597,61 e 595,58 mL CH₄.L⁻¹dia⁻¹, respectivamente, porém não houve diferenças estatisticamente significativas entre eles. No tratamento operado com 100 % de lodo flotado, foi observado acúmulo de AGCC ($9,7 \text{ g.L}^{-1}$) e de amônia livre (301 mg.L^{-1}), evidenciando a inibição das archaeas metanogênicas (25,99 %) e, consequentemente, reduzindo a produção de metano.

2.4 BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo metabólico que, a partir da atividade conjunta de microrganismos, transformam a biomassa em metano e dióxido de carbono. Esse processo é dividido em quatro fases, sendo: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, como apresentado na FIGURA 2, onde cada uma delas é conduzida por microrganismos distintos, os quais demandam condições ambientais específicas (AMARAL; STEINMETZ; KUNZ, 2022; GUERI; SOUZA; KUCZMAN, 2018).

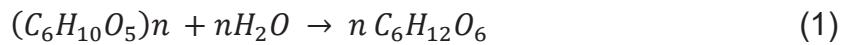
FIGURA 2 – PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA DIGESTÃO ANAERÓBIA



Fonte: (AMARAL; STEINMETZ; KUNZ, 2022).

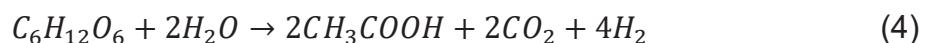
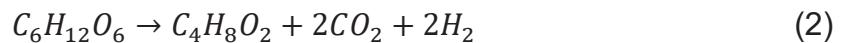
Na primeira etapa, chamada de hidrólise, as bactérias hidrolíticas degradam compostos de alta peso molecular como carboidratos, proteínas e lipídeos em substâncias orgânicas mais simples (monômeros) e solúveis. Essa conversão ocorre de forma lenta e em condições anaeróbias, devido a alguns fatores operacionais do reator, como: temperatura, tempo de retenção hidráulica, composição do substrato, pH, tamanho das partículas e concentração de amônia (CARVALHO, 2021).

Nessa etapa, as características do substrato podem interferir na taxa de degradação da matéria orgânica, ou seja, quando esse substrato for complexo e de difícil degradação a hidrólise assume uma importância significativa na velocidade global da degradação, podendo ser considerada a etapa que limita a velocidade do processo de digestão anaeróbia (AMARAL; STEINMETZ; KUNZ, 2022). Esse processo pode ser representado pela Equação 1.



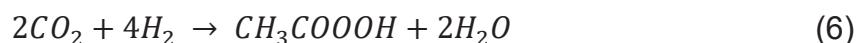
Na sequência, ocorre a etapa de acidogênese, onde os produtos solúveis da hidrólise são utilizados como substratos por bactérias acidogênicas, sendo degradados e formando componentes intermediários (moléculas com 1 a 5 carbonos), tais como ácidos graxos voláteis, álcoois, óxidos de nitrogênio, sulfeto de hidrogênio, hidrogênio e dióxido de carbono, além de promover o surgimento e crescimento de

novas células microbianas (Ghofrani-Isfahani et al., 2020). Nas Equações 2 a 5 são apresentadas as principais reações que ocorre na fase acidogênese.



Na fase acetogênese, as bactérias acetogênicas produzem ácido acético, dióxido de carbono e hidrogênio, a partir dos produtos formados na fase anterior. As bactérias acetogênicas estabelecem uma relação de sintrofia com as arqueas metanogênicas e bactérias homoacetogênicas, resultando na transformação de ácidos de cadeia longa em ácidos de cadeia curta, como o ácido fórmico e o acético, levando também à produção simultânea de hidrogênio e dióxido de carbono.

O equilíbrio dessa reação é favorecido pelas bactérias homoacetogênicas, as quais produzem acetato através do consumo de hidrogênio e dióxido de carbono (AMARAL; STEINMETZ; KUNZ, 2022), conforme apresentado na Equação 6.



Na etapa final, metanogênese, ocorre em condições exclusivamente anaeróbias, onde o carbono contido na biomassa é convertido a dióxido de carbono e metano pelas bactérias metanogênicas. De acordo com (AMARAL; STEINMETZ; KUNZ, 2022), existem dois mecanismos básicos para a geração de metano:

- a) Acetoclástico: as arqueas metanogênicas acetoclásticas realizam a conversão do acetato em metano.
- b) Metanogênese hidrogenotrófico: as arqueas metanogênicas hidrogenotróficas convertem hidrogênio e dióxido de carbono em metano.

Ambas as reações são caracterizadas por serem exotérmicas, liberando calor como resultado do processo de produção de metano, esse processo é descrito na TABELA 2.

TABELA 2 – REAÇÕES METANOGENÍCAS E ENERGIA LIVRE DE GIBSS ΔG

Reação química	ΔG (kJ.mol ⁻¹)
$4H_2 + HCO_3^- + H^+ \leftrightarrow CH_4 + 3H_2O$	-135,4
$CO_2 + 4H_2 \leftrightarrow CH_4 + 2H_2O$	-131,0
$CH_3COOH \leftrightarrow CH_4 + CO_2$	-36,0
$4HCOO^- + H_2O + H^+ \leftrightarrow CH_4 + 3HCO_3^-$	-130,4
$CH_3COO^\mp H_2O \leftrightarrow CH_4 + HCO_3^-$	-30,9
$4CH_3OH_3 \leftrightarrow CH_4 + HCO_3^\mp H^+ + H_2O$	-314,3
$CH_3OH + H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$	-113,0
$2CH_3CH_2OH + CO_2 \leftrightarrow CH_4 + 2CH_3COOH$	-116,3

FONTE: AMARAL; STEINMETZ; KUNZ, (2022); SILVA; BORTOLI, (2018).

De acordo com Cremonez et al., (2021) a etapa metanogênica pode ser afetada quando o substrato utilizado como matéria-prima no processo é baseado em compostos facilmente fermentáveis pois são extremamente sensíveis ao acúmulo de ácidos no meio.

Ao final do processo, temos o biogás, composto principalmente por metano (55 - 70 vol%) e dióxido de carbono (30 - 45 vol%) e vestígios de outros gases como sulfeto de hidrogênio (500 - 4000 ppm), amônia (100 - 800 ppm), hidrogênio (< 1 vol%), nitrogênio (< 1 vol%), oxigênio (< 1 vol%) e vapor de água (< 1 vol%) (Alves et al., 2013).

2.5 TRATAMENTO E PURIFICAÇÃO

Os substratos utilizados para a produção de biogás podem provir de diversas fontes industriais e agropecuárias. No entanto, algumas dessas fontes podem apresentar etapas de produção de biogás mais lentas ou até mesmo incompletas. O grau de pureza e a concentração de metano são fatores essenciais para determinar o potencial calorífico do biogás. Além disso, alguns contaminantes podem afetar o potencial energético do biogás, incluindo sulfeto de hidrogênio (H₂S), dióxido de carbono (CO₂), amônia (NH₃) e umidade.

O CO₂ e umidade são considerados impurezas pois reduzem a poder calorífico do biogás, já o H₂S e a NH₃ são altamente indesejáveis devido às suas propriedades corrosivas, sendo capazes de danificar equipamentos e acessórios empregados no processo de geração de energia (ALVES et al., 2013; AMARAL; STEINMETZ; KUNZ, 2022).

No QUADRO 1, são apresentadas as principais impurezas do biogás e os problemas gerados devido a sua presença.

QUADRO 1 – PRINCIPAIS IMPUREZAS DO BIOGÁS E CONSEQUÊNCIAS

Contaminante	Problemas
Água	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosão de compressores, tanques de combustíveis e motores pela formação de ácidos com H₂S, NH₃ e CO₂. - Acumulação de água nos dutos. - Condensação ou congelamento por pressão.
Material particulado	<ul style="list-style-type: none"> - Entupimento pela acumulação em compressores, tanques de combustíveis e motores.
Oxigênio	<ul style="list-style-type: none"> - Perigo de misturas explosivas pela elevada concentração de O₂ no biogás.
Amônia	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosão pela dissolução em água.
Sulfeto de Hidrogênio	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosão de compressores, tanques de combustíveis e motores. - Concentrações tóxicas no biogás. - Formação de SO_x pela combustão.
Dióxido de Carbono	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo valor energético.
Siloxanos	<ul style="list-style-type: none"> - Formação de SiO₂ e quartzo microcristalino pela combustão. - Deposição em velas de ignição, válvulas e cilindros.
Halogênios	<ul style="list-style-type: none"> - Corrosão em motores de combustão.

FONTE: Adaptado de (AMARAL; STEINMETZ; KUNZ, 2022).

2.6 ROTAS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS E DA QUEIMA DO LODO FLOTADO

Neste estudo, serão analisadas três vias tecnológicas para a geração de vapor, água quente e eletricidade. Essas abordagens serão exploradas por meio de dois mecanismos específicos: queima de biogás em caldeira, de forma conjunta com o cavaco; queima de biogás em motor de combustão interna; e queima de uma mistura de cavaco com lodo centrifugado em caldeira.

2.6.1 Queima do biogás em caldeira

Segundo a NBR 13.541 (ABNT, 2018) a caldeira é um equipamento destinado a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, e que se enquadra nas categorias definidas pela NR-13.

As caldeiras podem usar diferentes combustíveis como carvão, derivados de petróleo e gás natural, mas também existem caldeiras alimentadas por resíduos industriais ou biomassa, embora estas apresentem um desempenho inferior aos combustíveis fósseis (MOJICA-CABEZA et al., 2021). A eficiência das caldeiras é uma forma de medir a utilização da energia disponível no combustível (CHEN et al., 2021) e é um fator crítico que afeta o desempenho econômico e ambiental dos sistemas de geração de vapor.

Antunes (2019), analisou a viabilidade da implementação de um sistema de combustão de biogás como substituto da lenha em caldeiras flamotubulares. Embora sejam necessárias modificações na câmara de combustão da caldeira para acomodar o novo sistema, a proposta demonstrou viabilidade técnica. O retorno do investimento, estimado por meio do método de *payback* descontado, está projetado para ocorrer entre o segundo e o terceiro ano, sendo um cenário mais atrativo do que a venda do biogás.

2.6.2 Co-combustão de lodo flotado e cavaco de eucalipto

A compostagem representa o principal destino para o lodo desidratado, apesar dos custos elevados associados à disposição, coleta e transporte. Alternativas, como a co-combustão com cavaco e a produção de briquetes, ainda não estão amplamente implementadas. Tal fato ocorre, em grande parte, devido às preocupações com a corrosão de equipamentos causada pelas características químicas do resíduo e pelo seu elevado teor de umidade (FAGNANI, 2023).

Mantovan (2022), avaliou a co-combustão de diferentes proporções de lodo flotado centrifugado com 65 % de umidade em caldeiras a biomassa. No referido estudo, foram testadas as proporções de 0 %, 5 %, 10 %, 15 % e 20 % de lodo, em base mássica, adicionadas ao cavaco de eucalipto. Os resultados indicaram que a adição de lodo até a proporção de 15 % promoveu aumento progressivo da eficiência térmica, em decorrência da redução das perdas associadas aos gases de combustão.

Por outro lado, a utilização de 20 % de lodo resultou em discreta redução da eficiência, atribuída a dificuldades no fluxo de alimentação e ao incremento das perdas térmicas.

O lodo flotado possui um elevado potencial energético que demonstra a sua aplicação no processo de combustão. No entanto, o teor de umidade em média de 65 % contribui para redução do poder calorífico inferior (PCI) do combustível, sendo uma alternativa a secagem desse resíduo para 15 – 20 % (MANTOVAN, 2022). Os trabalhos de Sena et al. (2008), Virmond et al. (2008), Padilha et al. (2010) e Virmond, et al. (2011), avaliam o poder calorífico do lodo flotado, em base seca e livre de cinzas, com umidades mais baixas, conforme apresentado na TABELA 3.

TABELA 3 – RELAÇÃO ENTRE A UMIDADE E O PODER CALORÍFICO DO LODO FLOTADO

Autores	Sena et al. (2008)	Virmond et al. (2011)	Floriani et al. (2010)	Virmond et al. (2008)
Origem	Frigorífico de aves e suínos	Frigorífico de aves e suínos	Industria de processamento de carne	Frigorífico de aves e suínos
Umidade (%).	15	15	25,85	15
PCI (MJ.kg ⁻¹)	28,2	25,77	21,24	27,18

FONTE: Adaptado de Mantovan (2022).

Verifica-se que os lodos flotado com menor teor de umidade apresentam maior poder calorífico. Contudo, a redução da umidade deve ser analisada sob a perspectiva econômica, pois, apesar do aumento significativo no PCI, os custos associados ao processo de secagem podem tornar sua aplicação inviável.

Silva et al. (2025) avaliaram a co-combustão de lodo de esgoto, obtido em Estação de Tratamento de Efluentes (ETA) de uma companhia de saneamento, e carvão mineral em um combustor de leito fluidizado borbulhante em escala de bancada, com potência térmica aproximada de 4,5 kW. A caracterização da amostra de 100% de lodo (secado até 11,10 % de umidade higroscópica), possibilitou verificar que ele possui bom potencial energético, com poder calorífico de 16,276 MJ.kg⁻¹, sendo superior a amostra de 100 % de carvão mineral (1,25 % de umidade higroscópica), resultando em 15,486 MJ.kg⁻¹.

Além disso, os autores constataram que a adição de lodo de esgoto ao carvão mineral reduziu o teor de cinzas em comparação com o carvão mineral puro. Além disso, os autores destacaram que para que o lodo seja utilizado adequadamente, é

necessário reduzir sua umidade a níveis que o tornem viável para ser transportado pelo alimentador até a câmara de combustão.

Machado (2021), avaliou a co-combustão em caldeira utilizando lodo flotado, previamente seco até atingir 15 % de umidade, proveniente da estação de tratamento de uma indústria alimentícia, juntamente com cavaco de eucalipto com teor de umidade de 30 %. A avaliação consistiu na queima de 20 % (em massa) de lodo flotado com 80 % de cavaco de eucalipto, resultando na redução de 23,7 % de consumo de cavaco na caldeira e na queda do custo por tonelada de vapor de R\$ 9,20, com custo da tonelada de cavaco de R\$ 130,00.

O autor também relatou que o alto teor de cinzas do lodo foi apontado como desvantagem, pois aumenta a geração de resíduos. Entretanto, do ponto de vista econômico, o projeto mostrou Payback simples de 34 meses, Taxa Interna de Retorno (TIR) de 27 % (acima da taxa mínima de atratividade) e Valor Presente Líquido (VPL) positivo, sendo considerado viável.

2.6.3 Queima de biogás em motor de combustão interna

Os motores de combustão interna (MCI) são os principais dispositivos empregados na geração de energia elétrica a partir do aproveitamento do biogás como combustível primário. Esses motores funcionam através do ciclo Otto, com ignição por centelha, ou pelo ciclo Diesel, ignição dada por compressão (Novak et al., 2016).

De acordo com Novak et al., (2016), o ciclo Otto é mais fácil de adaptar para biogás, devido as unidades já existentes e adaptadas para gás natural, sendo necessário apenas a regulagem no carburador para a queima de uma mistura ar e combustível mais pobre. Além disso motores a ciclo Otto podem trabalhar com mistura pobre a fim de minimizar as emissões de monóxido de carbono, requerendo biogás com no mínimo 45 % de metano (XIMENES, 2024).

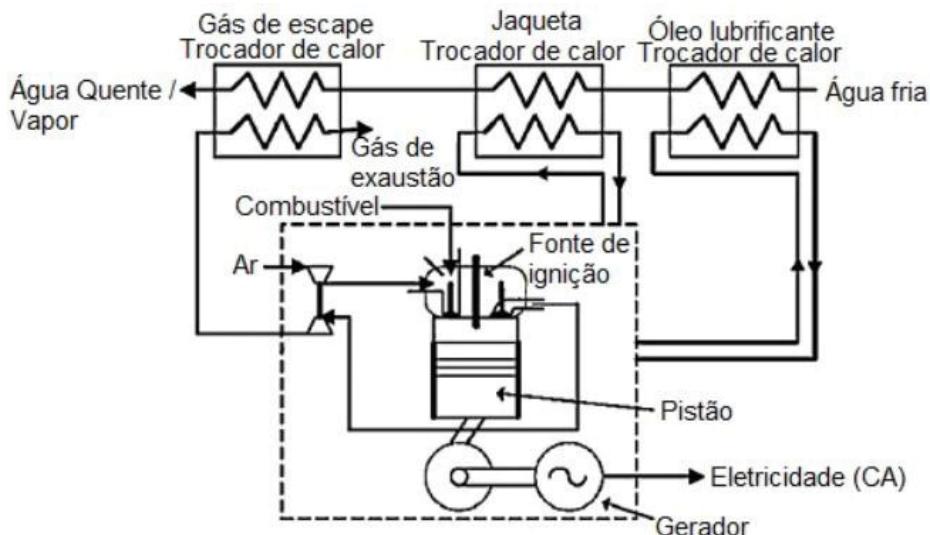
Já para a utilização do motor Diesel, esse deve ser adaptado para utilizar biogás com introdução de um misturador na entrada do ar, antes de ser comprimido. Nesse motor ocorre a autoignição do diesel junto com a mistura ar-biogás, podendo reduzir o consumo de diesel em valores acima de 80 % (NOVAK et al., 2016).

Segundo Xavier (2016), os motores de combustão interna são amplamente utilizados em plantas estacionárias para gerar eletricidade. Eles são preferidos por

sua facilidade de uso, manutenção simples, operação econômica, e por serem ideais para geração em pequena escala e em locais isolados. Além disso, os MCI são especialmente atrativos para plantas de cogeração devido ao baixo custo de aquisição, alta eficiência e ampla faixa de aplicação, que varia de 75 kW a 50 MW, sendo combinação de várias unidades em paralelo.

As principais formas de dissipação de calor nesses motores ocorrem através dos gases de exaustão, que podem ser utilizados para a geração de vapor; da água de arrefecimento, também conhecida como água da jaqueta, que pode ser aproveitada no aquecimento de água; e do óleo lubrificante (XAVIER, 2016). A FIGURA 3 ilustra o ciclo de um motor de combustão interna com cogeração.

FIGURA 3 – MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA COM COGERAÇÃO



FONTE: Adaptado de Aussant et al., (2009).

Os gases de escape do motor, normalmente estão com temperaturas entre 400 e 500 °C, podendo ser utilizados em um trocador de calor para geração de vapor ou de água quente. Além disso, o calor residual dissipado pelo sistema de resfriamento do motor é aproveitado para produzir água quente por meio de outro trocador de calor.

Loyola et al. (2022), analisaram a repotenciação do sistema de geração elétrica a biogás, que substituiu uma central termelétrica a vapor de aproximadamente 1 MW elétrico por três motores de combustão interna de 1 MW elétrico cada. O estudo teve como objetivo avaliar o potencial de aproveitamento do calor residual dos gases de exaustão e da água de resfriamento para aumentar a eficiência do sistema por

meio da cogeração e da repotenciação com ciclos Rankine orgânicos (ORC). O balanço energético indicou que 34 % da energia do biogás foi convertida em eletricidade, enquanto 49,8 % se perderam pelos gases de exaustão (25,2 %) e pela água de resfriamento (24,6 %), revelando um potencial de cogeração próximo de 84 %.

Alcântara (2019) teve como objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica de um sistema de trigeração baseado em motores de combustão interna alimentado a gás natural, utilizando os gases de exaustão para gerar vapor saturado em uma caldeira de recuperação e acionar chillers de absorção. A análise de viabilidade indicou que, enquanto cenários com trigeração completa apresentaram VPL negativo, a utilização do motor associada à caldeira de recuperação para geração de vapor proporcionou melhor retorno financeiro, com VPL de R\$ 1.016.000,00, TIR de 110,26% e payback de 3,4 anos, demonstrando que o aproveitamento do calor dos gases de exaustão é uma estratégia promissora para indústrias com demanda contínua de vapor e frio.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 CENÁRIO BASE

O presente estudo foi desenvolvido com base em dados reais de uma agroindustria localizada no oeste do estado do Paraná. O complexo industrial é composto por um abatedouro de aves, um abatedouro de peixes, uma fábrica de produtos industrializados e uma fábrica de ração animal. O abatedouro possui vazão média de efluente de $620 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, sendo destinado ao processo de flotação físico-química. Após esse processo, gera-se cerca de $33 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ de lodo flotado, ou seja, $792 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$.

3.1.1 Geração de vapor e água quente

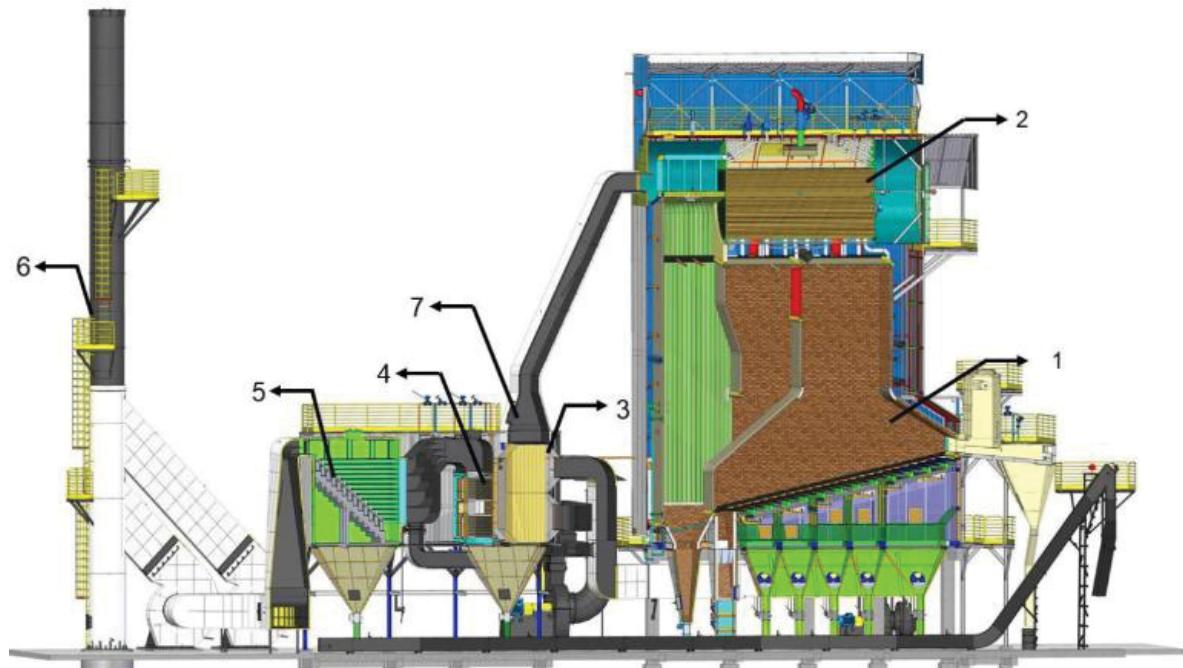
A planta analisada possui um sistema de geração de vapor que utiliza cavacos de eucalipto como combustível, adquirido a um valor médio de R\$ 300,00 por tonelada. O sistema possui uma capacidade nominal de 40 t.h^{-1} de vapor saturado a 10 bar, porém opera atualmente com carga média de 22 t.h^{-1} para satisfazer as necessidades dos seguintes processos: tanques de escaldagem, higienização de caixas, produção de subprodutos, trocadores de calor para aquecimento de água, instalações de produção industrial, tratamento de efluentes, lavanderia, refeitório, entre outros.

A caldeira empregada na planta é do tipo mista, combinando características construtivas de caldeiras flamotubulares e aquatubulares. É equipada com grelha móvel reciprocante e sua fornalha é revestida por paredes d'água compostas por tubos aletados, que se conectam a um tambor flamotubular, através do qual os gases quentes de combustão passam em dois estágios. Após a transferência de calor no tambor, os gases de combustão prosseguem para a seção de recuperação de calor. Nessa fase, eles inicialmente passam pelo pré-aquecedor de ar, onde o calor é transferido para o ar primário, que entra na fornalha a uma temperatura superior à do ar secundário, mantido à temperatura ambiente.

Em seguida, os gases de combustão passam pelo economizador, que é utilizado para aquecer a água de alimentação da caldeira. Depois, os gases fluem através do multiciclone, onde parte do material particulado é retido. Por fim, os gases

seguem pelo percurso até a chaminé, onde são liberados na atmosfera. A representação esquemática do gerador de vapor está disposta na FIGURA 4.

FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO GERADOR DE VAPOR

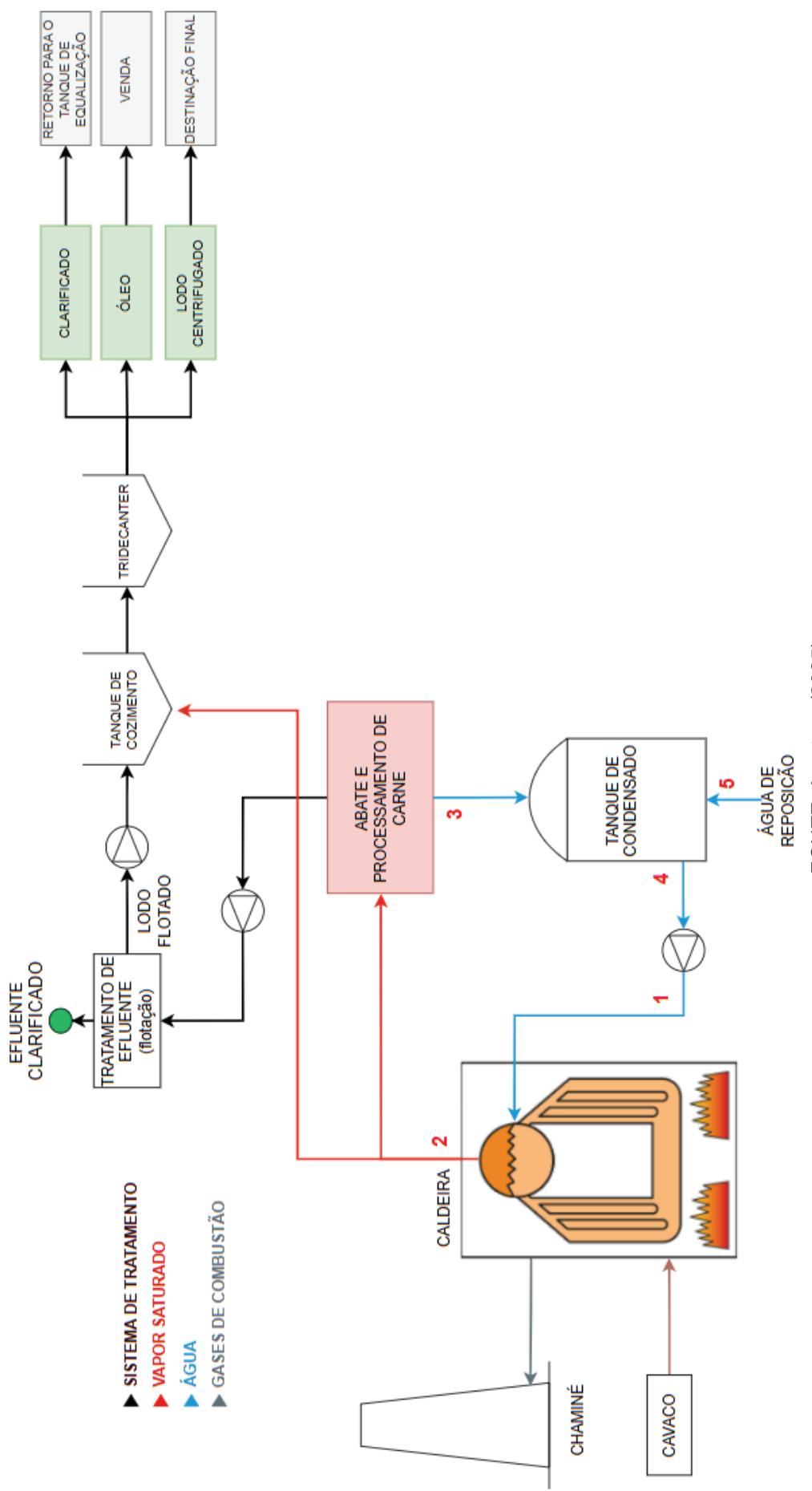


FONTE: Mantovan (2022).

LEGENDA: 1) fornalha; 2) tambor flamotubular; 3) pré-aquecedor de ar; 4) economizador; 5) multiciclone; 6) chaminé; 7) ponto de aferição dos gases de combustão.

São analisados diversos fatores, incluindo a demanda de cavacos de eucalipto necessária para atingir a produção desejada de vapor, o processo de geração de resíduos industriais e a quantidade de efluentes produzidos. Também são considerados os custos associados ao tratamento e disposição do lodo flotado gerado no processo industrial, conforme apresentado na FIGURA 5.

FIGURA 5 – DIAGRAMA DE FLUXO DE PROCESSO DO CENÁRIO BASE



Legenda: Os números destacados em vermelho no fluxograma destacam o processo termodinâmico analisado para a geração de vapor saturado.

FONTE: A autora (2025).

O ponto (1) refere-se à água de alimentação da caldeira, que está a uma pressão de 10 bar e há uma bomba com 88% de eficiência. Nesse ponto foram aplicados os balanços de energia e de massa a partir das Equações (7) e (8), respectivamente, e obteve-se a temperatura de 61,29 °C para o ponto (1), considerando regime permanente. Foi considerado que as purgas da caldeira correspondem a 3 % da demanda de vapor saturado na indústria, conforme relatado por Mantovan, (2022), com isso, determinou-se que a vazão de água necessária para o ponto (1) é de 6,294 kg.s⁻¹.

$$\sum m_{\text{entrada}} * h_{\text{entrada}} + \dot{W}_{\text{bomba}} = \sum m_{\text{saída}} * h_{\text{saída}} \quad (7)$$

$$\sum m_{\text{entrada}} = \sum m_{\text{saída}} \quad (8)$$

onde,

m_{entrada} corresponde a todas as correntes de entrada (kg.s⁻¹);

h_{entrada} entalpia específica de cada corrente de entrada (kJ.kg⁻¹);

$m_{\text{saída}}$ corresponde a todas as correntes de saída (kg.s⁻¹);

$h_{\text{saída}}$ entalpia específica de cada corrente de saída (kJ.kg⁻¹);

Almeida, (2018), realizou um estudo no mesmo complexo industrial avaliado nesta pesquisa, apresentando os resultados de operação de uma caldeira com geração de 40 t/h de vapor saturado a 10 bar absoluto. A análise, baseada na curva de eficiência fornecida pelo fabricante, indicou que a eficiência máxima ocorre em condições de carga entre 70% e 80%, sendo registrada uma eficiência de 87,6% em carga total. Assim, neste trabalho, adota-se como hipótese que a caldeira apresenta eficiência η_{caldeira} de 87,6%, conforme os resultados obtidos por Almeida (2018).

No ponto (2) é a saída de vapor saturado, podendo ser determinada a quantidade de cavaco de eucalipto consumido pela caldeira por meio do método direto ASME PTC-4 (2009) o qual exige medições diretas e precisas da vazão de água de alimentação, do vapor produzido e do consumo de combustível, podendo ser definido por meio da Equação (9). Para esse cálculo, considerou-se a eficiência da caldeira de 87,6 % e o poder calorífico inferior do cavaco PCI_{cavaco} (base úmida) de 10.366 kJ.kg⁻¹, com base em Almeida, (2018).

$$\eta_{caldeira} = \frac{Q_{vapor}}{Q_{cavaco}} \quad (9)$$

onde Q_{vapor} (kW) é o calor útil gerado pela caldeira, sendo calculado de acordo com a Equação (10):

$$Q_{vapor} = m_2 * h_2 - m_1 * h_1 \quad (10)$$

onde,

m_2 é a vazão mássica de vapor no ponto (2) (kg.s^{-1});

h_2 é a entalpia no ponto (2) (kJ.kg^{-1});

m_1 é a vazão mássica de vapor no ponto (1) (kg.s^{-1});

h_1 é a entalpia no ponto (1) (kJ.kg^{-1});

E Q_{cavaco} (kW) é o calor disponibilizado pelo cavaco de eucalipto, podendo ser obtido por meio da Equação (11), em que m_{cavaco} é a vazão mássica de combustível (kg.s^{-1}):

$$Q_{cavaco} = m_{cavaco} * PCI_{cavaco} \quad (11)$$

A água utilizada para alimentar a caldeira é proveniente do tanque de condensado. Este tanque recebe tanto o condensado retornado da indústria ponto (3) quanto a água de reposição ponto (5) a uma temperatura de aproximadamente 25 °C e pressão de 1,01 bar necessária para compensar a quantidade de vapor diretamente utilizada no processo industrial. Neste estudo, considera-se que 50 % do vapor destinado à planta é utilizado diretamente e não retorna à caldeira, enquanto os outros 50 % condensam e retornam ao tanque de condensado com título igual a zero e à pressão ambiente.

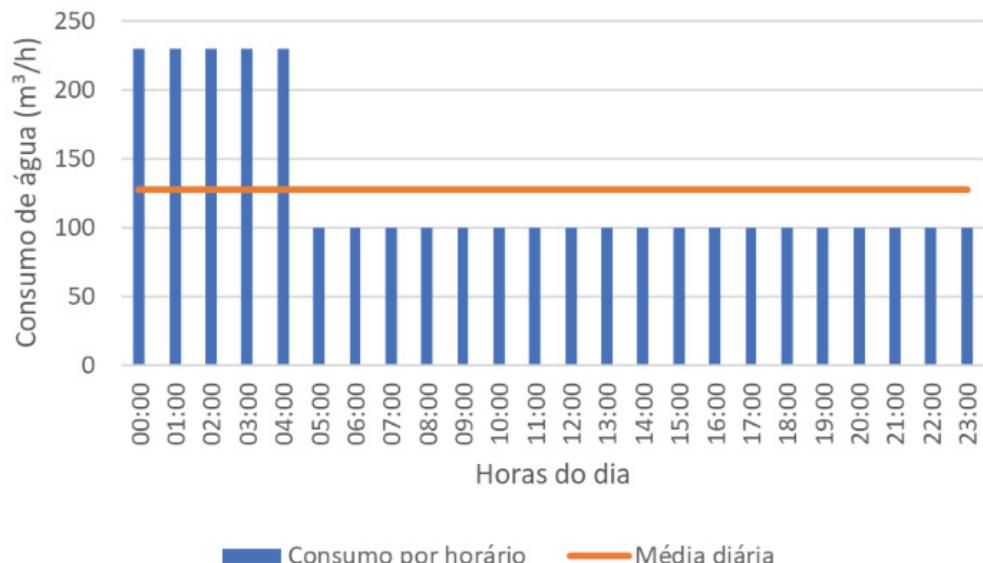
Essa hipótese é importante para refletir as condições reais de operação da planta, onde parte do vapor é consumido diretamente nos processos produtivos e não retorna ao sistema de geração. Essa consideração impacta diretamente os balanços de massa e energia, aumentando a demanda por água de reposição e, consequentemente, o consumo energético do sistema. A adoção de um retorno de 50 % com título zero e à pressão ambiente representa uma estimativa conservadora,

adequada para a avaliação da eficiência térmica e da viabilidade das alternativas propostas neste estudo.

No ponto (4), a pressão é de 1,01 bar. Para determinar a temperatura neste ponto, primeiramente realiza-se um balanço de energia das correntes (3) e (5), conforme a Equação (13). Esse balanço permite obter a entalpia específica da mistura resultante no ponto (4). Em seguida, a temperatura é determinada a partir do valor da entalpia e da pressão da água no ponto (4), utilizando-se as propriedades termodinâmicas da água no EES.

Almeida (2018), realizou o levantamento do consumo de água quente a 50°C e foi observado que da meia noite às quatro da manhã, o consumo médio de água é de 230 m³.h⁻¹ devido ao processo de higienização feito nesse horário. Depois, o consumo diminui para aproximadamente 100 m³.h⁻¹ no resto do dia. Diante disso, a vazão de água quente considerada para a análise nesse trabalho foi considerando uma média de 127 m³.h⁻¹, conforme FIGURA 6.

FIGURA 6 – CONSUMO MÉDIO DIÁRIO DE ÁGUA QUENTE



FONTE: a autora (2025).

Para calcular a energia térmica necessária para aquecer a água até 50 °C, utiliza-se a Equação (12):

$$Q = m * c * \Delta T \quad (12)$$

onde, Q (kJ) representa a quantidade de calor, m (kg) é a massa de água, c (kJ.kg $^{-1}$.°C $^{-1}$) é o calor específico da água e ΔT (°C) é a variação de temperatura, sendo $T_f = 50$ °C e $T_i = 25$ °C. Neste estudo, considera-se como temperatura final da água o valor de 50 °C, correspondente à temperatura de utilização da água quente no complexo industrial. Já a temperatura inicial é adotada como 25 °C, valor representativo da água de reposição do trocador de calor.

3.1.2 Sistema de tratamento de efluente

Com base em dados fornecidos pelo complexo industrial, a vazão média de efluente gerado é de 620 m $^3.h^{-1}$, sendo destinado ao processo de flotação físico-química. Após esse processo, gera-se cerca de 33 m $^3.h^{-1}$ de lodo flotado, ou seja, 792 m $^3.dia^{-1}$.

O processo de tratamento do lodo flotado envolve seu cozimento e desidratação em um tridecanter. Inicialmente, o lodo é aquecido com vapor direto até atingir 95°C por um período mínimo de 30 minutos. Em seguida, o lodo é centrifugado no tridecanter a 2800 rpm. Esse processo resulta na separação do lodo flotado em três fases: óleo, com uma produção de aproximadamente 6.000 L·dia $^{-1}$, lodo centrifugado, com massa de 40 t·dia $^{-1}$ e teor de umidade aproximado de 65 %, e o efluente clarificado, correspondendo a cerca de 747 m $^3.dia^{-1}$. Esse balanço evidencia que a maior parte da água presente no lodo inicial permanece no efluente clarificado, enquanto os sólidos e o óleo são concentrados nas respectivas frações de saída.

Esses processos levam ao consumo de vapor e energia elétrica o qual servirão como base para o cálculo de viabilidade de implementação dos cenários propostos.

Para calcular a energia térmica necessária para aquecer o lodo até 95 °C, utiliza-se a Equação (13), onde c (kJ.kg $^{-1}$.°C $^{-1}$) é o calor específico do lodo flotado e ΔT (°C) é a variação de temperatura, sendo $T_{int}=95$ °C e $T_{ext}=25$ °C. O calor específico do lodo flotado foi definido conforme Amaral; Steinmetz; Kunz, (2022):

$$c = 4,19 - 0,00275 * S_{ST} \quad (13)$$

onde, S_{ST} é a concentração de sólidos totais no lodo (g.L^{-1}), valor obtido por Fagnani, (2023) de $55,23 \text{ g.L}^{-1}$.

Para o processo de desidratação do lodo flotado, para fins de estimativa da energia utilizada, adotou-se 1 tridecanter modelo LWS500*2000 da marca SENZ, de 45 kW e capacidade de 5 a $35 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ e o custo da energia elétrica foi estimado em $\text{R}.\text{kWh}^{-1} 0,42$.

A indústria possui um custo de $\text{R}.\text{ton}^{-1} 175,00$ para a correta destinação do lodo centrifugado, além do custo de transporte de $\text{R} \$ 1.083,00$ por carga, considerando que cada carga corresponde a 8 toneladas. O efluente clarificado retorna para o tanque de equalização. Além disso, nesse processo há uma receita, onde o litro óleo gerado no processo de tratamento é vendido por $\text{R} \$ 3,00$.

Este cenário serve como referência para comparar a eficiência energética e a redução de uso de cavaco nos cenários alternativos.

3.2 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

3.2.1 Dimensionamento do biodigestor

O dimensionamento do biodigestor foi realizado considerando o lodo flotado proveniente do processo de tratamento de efluentes do complexo industrial. A análise teve como objetivo estimar a produção de biogás, considerando as características físico-químicas do lodo e as condições operacionais do sistema e os resultados dessa análise serão aplicados nos Cenários 1 e 2, os quais serão apresentados na próxima seção.

Fagnani, (2023) recomenda um tempo de retenção hidráulica (TRH) de 20 dias para garantir que o material permanecesse no interior do reator tempo suficiente para que a degradação da matéria orgânica atingisse níveis próximos da máxima eficiência. Com base nesse tempo e na vazão diária de lodo flotado, o volume total necessário do biodigestor foi calculado em aproximadamente 16.000 m^3 .

Além disso, devido ao volume de substrato, Fagnani (2023) recomenda utilizar mais do que um biodigestor e, para fins deste trabalho foram considerados 4 biodigestores CSTR BR de 4.000 m^3 cada, visando otimizar a agitação e o aquecimento do substrato.

Para avaliar a operação do sistema e realizar a análise preliminar de viabilidade, considerou-se no projeto a aquisição e instalação de equipamentos essenciais, incluindo sistemas de desumidificação e compressão de biogás, garantindo que o biogás gerado seja tratado e preparado para utilização segura. Além disso, no Cenário 1, será implementado um sistema de combustão tipo duobloco, acoplado a caldeira, para queima do biogás e aproveitamento energético.

Cada biodigestor será equipado com agitadores de alta potência, garantindo homogeneização adequada do substrato e otimização da digestão anaeróbia. Complementando o sistema, são previstas obras civis para escavação, concretagem e construção de bases, além de equipamentos laboratoriais para análise e monitoramento em tempo real do biogás produzido, como analisadores e flare de segurança.

No que se refere aos custos operacionais, incluem-se o consumo de energia elétrica para aquecimento e agitação do substrato, a manutenção anual dos biodigestores, da caldeira e do motor de combustão interna, bem como a contratação de um funcionário adicional responsável pela operação e monitoramento do sistema.

Dessa forma, o investimento abrange todos os componentes necessários para a operação eficiente e segura do sistema de biodigestão, desde a recepção e mistura do lodo flotado até a produção e queima controlada do biogás, justificando o custo associado à aquisição de reatores, agitadores, sistemas de desumidificação, compressão, combustão, obras civis e instrumentação de monitoramento.

3.2.2 Estimativa de produção de biogás

O lodo flotado possui alta concentração de matéria orgânica e lipídica, características que aumentam o potencial de produção de biogás durante a digestão anaeróbia e para a estimativa da produção de biogás, serão utilizados dados apresentados por (FAGNANI, 2023).

Esses dados foram extraídos de um estudo abrangente sobre a biodigestão de lodo flotado da mesma indústria, o qual fornece informações detalhadas sobre a composição do afluente, os sólidos voláteis do afluente e do efluente, e os rendimentos de conversão de sólidos voláteis em metano. A TABELA 4 resume algumas informações extraídas do estudo de (FAGNANI, 2023).

TABELA 4 – DADOS DE SÓLIDOS TOTAIS E RENDIMENTOS DE CONVERSÃO

Parâmetro	Valor
Sólidos voláteis do afluente ($SV_{afluente}$) (g.L ⁻¹)	50,76
Sólidos voláteis do efluente ($SV_{efluente}$) (g.L ⁻¹)	11,14
Rendimento de metano por sólidos voláteis removido (R_{CH4}) (mLCH ₄ .g ⁻¹ SV _{rem})	310,95

FONTE: Adaptado de Fagnani, (2023).

A partir dessas informações, foi possível estimar o volume de biogás gerado pela biodigestão dos efluentes industriais por meio da Equação (14) apresentado por Fuess (2017), permitindo projeções para a implementação em escala industrial.

$$V_{Metano} = \frac{(SV_{afluente} - SV_{efluente}) \cdot Qr \cdot R_{CH4}}{\%_{CH4}} \quad (14)$$

onde, Qr (m³.dia⁻¹) é a vazão de alimentação do reator, $\%_{CH4}$ é a porcentagem de metano no biogás e V_{Metano} (m³.dia⁻¹) é o volume de biogás gerado por dia. E para a determinação do volume de biogás gerado por dia, considerou-se uma porcentagem de metano de 62,28%.

Para os cálculos de utilização do biogás na indústria, considerou-se o poder calorífico inferior do metano como 4.799,6 kcal.m⁻³ (ABNT NBR15213, 2008; BLEY, 2015).

3.3 CENÁRIOS ANALISADOS

Nesta seção, são descritos os procedimentos adotados para a realização de simulações termodinâmicas de três diferentes rotas para a geração de vapor, água quente e eletricidade. As rotas analisadas envolvem a queima de biogás em caldeira e em motor de combustão interna (MCI) e a queima de uma mistura de cavaco de eucalipto com lodo flotado em caldeira. As simulações têm objetivo de comparar os resultados obtidos com os do cenário atual da empresa, denominado Cenário Base.

As simulações foram realizadas por meio do software *Engineering Equation Solver* (EES), com o propósito de avaliar a redução da utilização de cavacos de eucalipto para a geração de vapor saturado e o consumo de energia elétrica, a partir dos resíduos orgânicos da própria indústria. Este software permite a modelagem

precisa dos processos de geração de energia, possibilitando a análise detalhada dos balanços de energia e de massa, além de uma avaliação da eficiência de cada rota tecnológica.

Além disso, foram incluídas análises preliminares de viabilidade econômica dos projetos conceituais relacionados à implantação de cada uma das alternativas propostas. Os cenários considerados foram:

- a) Cenário 1: os resíduos gerados pelo abate e processamento de carne são destinados ao processo de tratamento e, após o processo de flotação físico-químico, o lodo flotado é enviado para o processo de biodigestão. Após a biodigestão, o biogás passa por um processo de remoção de H₂S, resultando em um gás composto por 60% de CH₄ e 40% de CO₂. A geração de vapor para o processo ocorre por meio da queima de biogás e cavaco, sendo ambos queimados simultaneamente na mesma caldeira. Parte desse vapor é destinado para a geração de água quente, seguindo o mesmo processo do cenário base.
- b) Cenário 2: neste cenário, o biogás é utilizado como combustível em um motor de combustão interna para a geração de eletricidade. Com o objetivo de maximizar o aproveitamento energético, um trocador de calor é acoplado ao sistema de exaustão do motor, permitindo a recuperação do calor contido nos gases de escape para a produção de vapor saturado. Adicionalmente, o calor proveniente do sistema de arrefecimento do motor é aproveitado para a geração de água quente, a ser empregada nos processos industriais. Simultaneamente, mantém-se a queima de cavacos de madeira na caldeira, de forma a complementar a demanda de vapor saturado requerida pela indústria.
- c) Cenário 3: foi considerada a utilização de mistura de cavaco de eucalipto com lodo flotado centrifugado como combustível alternativo para a geração de vapor em caldeira. Inicialmente, o lodo flotado, proveniente do processo de tratamento de efluentes da indústria, foi submetido a um processo de cozimento e centrifugação, com o objetivo de reduzir seu teor de umidade para aproximadamente 65 %. A proporção de mistura entre o lodo flotado e o cavaco foi estabelecida considerando o limite máximo de 20 % (em massa), conforme disposto

na Resolução SEMA nº 42 (SEMA, 2008), que regulamenta os critérios para a queima de resíduos em caldeiras. Os valores de poder calorífico inferior (PCI) dos materiais foram definidos com base em dados disponíveis na literatura. Nesse cenário, a queima da mistura na caldeira resulta na geração de vapor saturado e água quente, os quais são utilizados nos processos térmicos da planta industrial.

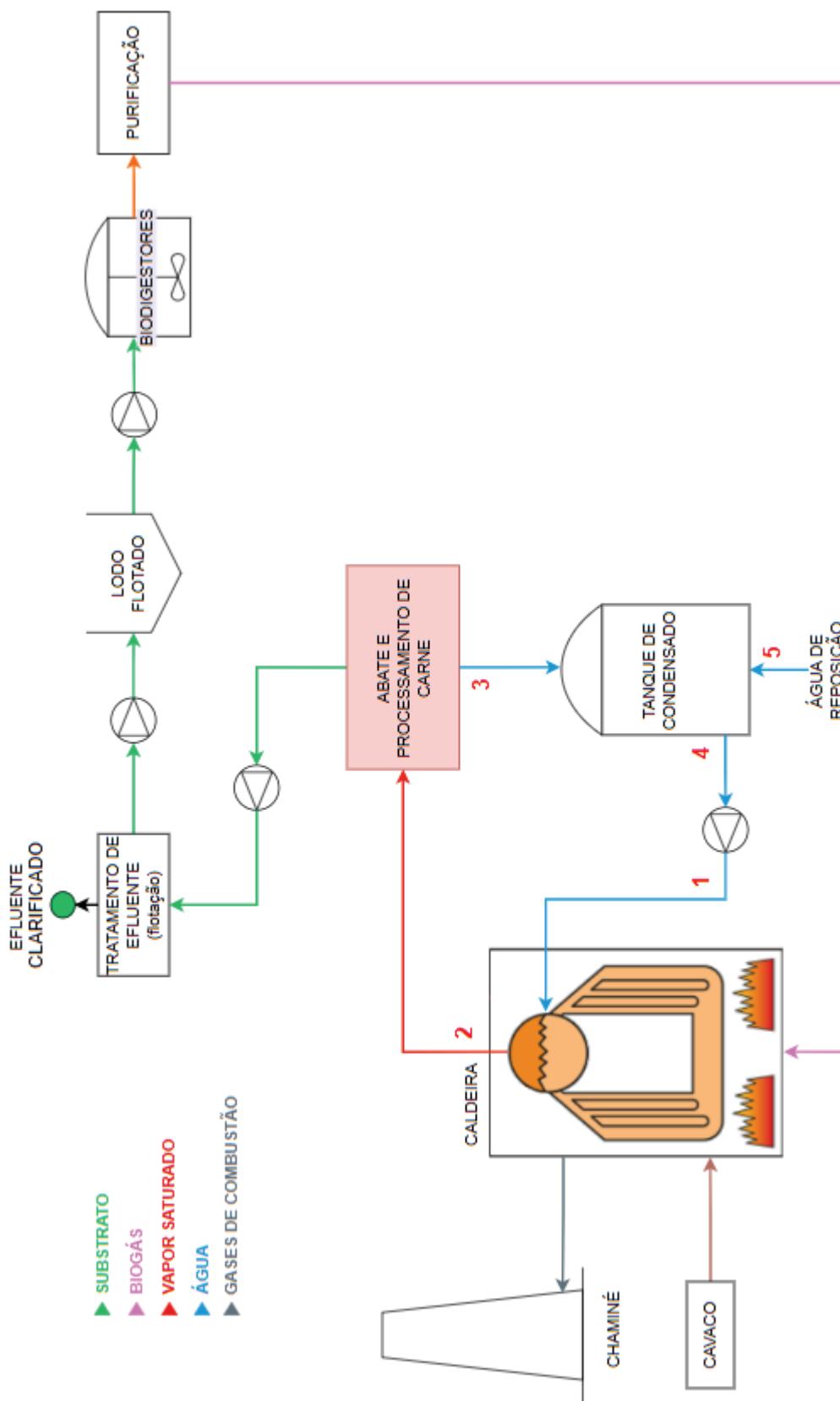
As simulações consideraram parâmetros operacionais de uma indústria de abate e processamento de carnes e as condições específicas de cada cenário. Além disso, as simulações contam com análises de viabilidade dos projetos conceituais para a implantação de cada um dos casos.

3.3.1 Cenário 1: produção de biogás e queima em caldeira

O cenário 1, apresentado na FIGURA 7, explora a utilização do lodo flotado em biodigestores para gerar o biogás, que será utilizado na queima em uma caldeira, substituindo parcialmente os cavacos de eucalipto. Esse cenário visa reduzir o consumo de cavaco e otimizar o uso dos resíduos da indústria, contribuindo para a eficiência energética e sustentabilidade da planta industrial.

Os dados da planta foram apresentados na seção 3.1 e o processo de biodigestão anaeróbia adotado para o cenário foi apresentado na seção 3.2.

FIGURA 7 – DIAGRAMA DE FLUXO DE PROCESSO DO CENÁRIO 1



FONTE: A autora (2025).

Para a queima do biogás, foi considerado na análise de viabilidade a aquisição de sistema de desumidificação e compressão do biogás além da instalação do sistema de combustão tipo duobloco para realizar adequadamente a queima do biogás em caldeira.

Para determinar a redução de cavaco foi aplicado um balanço de energia no ponto (2), considerando a queima de cavaco e biogás na caldeira.

$$m_2 * h_2 - m_1 * h_1 = \eta_{cald} * (m_{cavaco} * PCI_{cavaco} + v_{biogás} * PCI_{biogás}) \quad (15)$$

onde,

m_{cavaco} é a vazão mássica de cavaco (2) (kg.s^{-1});

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

$v_{biogás}$ é a vazão volumétrica de biogás ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$);

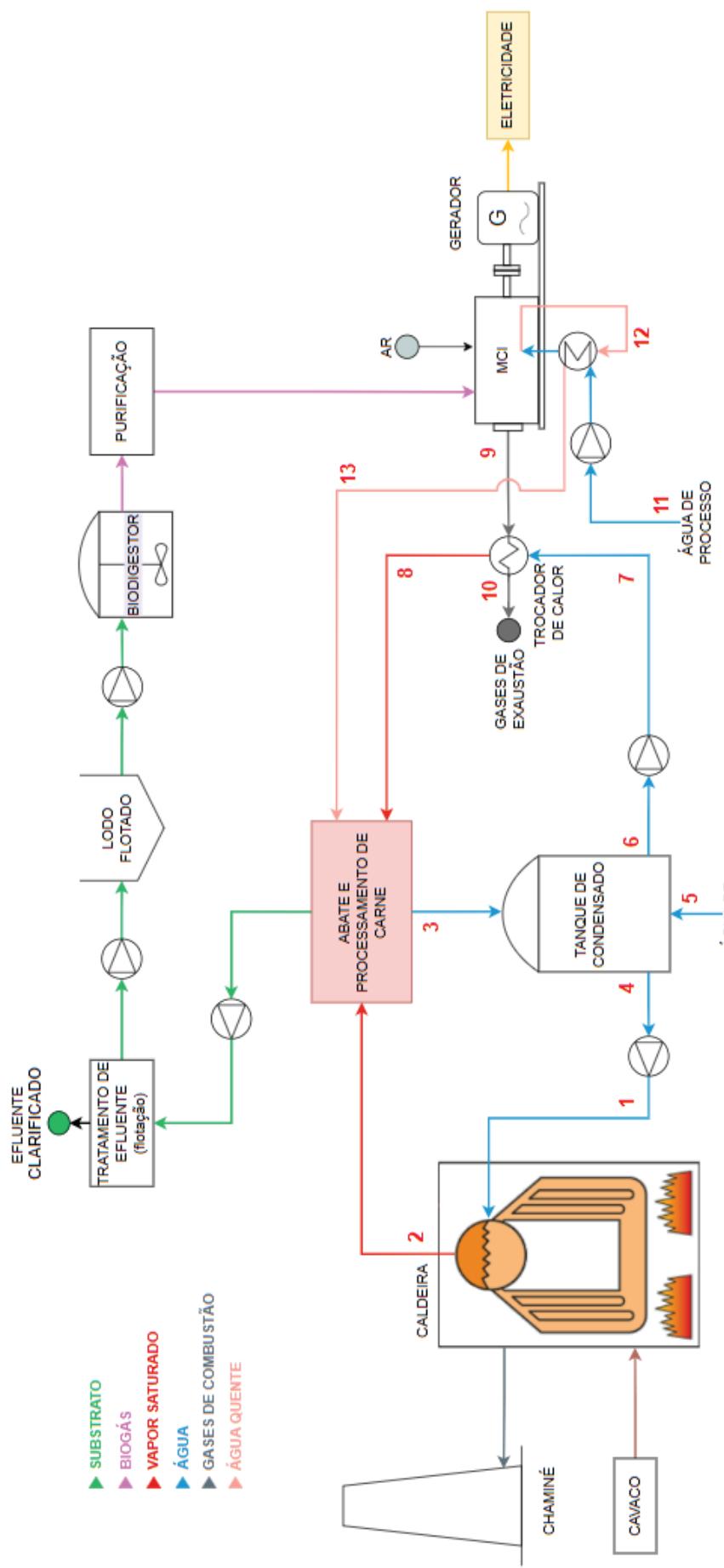
$PCI_{biogás}$ é o poder calorífico inferior do biogás (kJ.m^{-3}).

3.3.2 Cenário 2: produção de biogás e queima em motor de combustão interna

No Cenário 2, apresentado na FIGURA 8, o biogás é utilizado como combustível em um motor de combustão interna para a geração de eletricidade, ponto (15). Com o objetivo de maximizar o aproveitamento energético, um trocador de calor é acoplado ao sistema de exaustão do motor (11), permitindo a recuperação do calor contido nos gases de escape para a produção de vapor saturado (8).

Adicionalmente, o calor proveniente do sistema de arrefecimento do motor (12) é aproveitado para a geração de água quente, a ser empregada nos processos industriais (11). Simultaneamente, mantém-se a queima de cavacos de madeira na caldeira, de forma a complementar a demanda de vapor saturado requerida pela indústria.

FIGURA 8 – DIAGRAMA DE FLUXO DO PROCESSO DO CENÁRIO 2



FONTE: A autora (2025).

A partir do volume de biogás gerado e de seu poder calorífico inferior (PCI), foi possível determinar o potencial energético disponível e esse valor serviu de base para a seleção do equipamento de conversão energética. Optou-se por um motor de combustão interna (MCI) modelo SGE-56HM, fabricado pela Guascor, com eficiência elétrica de 35%, cujo desempenho é amplamente consolidado em aplicações de geração distribuída com biogás.

O volume diário de biogás disponível permite uma potência efetiva de aproximadamente 1.274 kW, valor que se encontra dentro da faixa operacional do motor selecionado, garantindo aproveitamento adequado do combustível sem sobrecarga da unidade.

A energia elétrica será gerada pela conversão da energia mecânica do motor em eletricidade, utilizando um gerador de corrente alternada. A produção de energia elétrica será avaliada a partir da potência mecânica fornecida pelo motor e da eficiência do motor.

A geração de vapor saturado foi determinada a partir do balanço de energia aplicado ao trocador de calor, adotando-se uma eficiência de 100% e considerando a vazão dos gases de exaustão do motor de combustão interna de 1,82 kg/s a uma temperatura de 470 °C, conforme apresentado pelo fabricante, representado pelo ponto (9). Os resultados permitiram quantificar a produção de vapor obtida pela recuperação energética desses gases, por meio da Equação (16):

$$m_{vapor} = \frac{\eta_{trocador} * Q_{gases,exaus}}{h_8 - h_7} \quad (16)$$

onde $Q_{gases,exaus}$ (kW) é a quantidade de calor disponibilizada pelos gases de exaustão do motor de combustão, podendo ser calculado pela Equação (17):

$$Q_{gases,exaus} = m_9 * CP_{gases} * (T_9 - T_{10}) \quad (17)$$

onde,

CP_{gases} foi considerado o valor de 1,10 kJ.kg⁻¹.°C⁻¹ e adotou-se uma temperatura $T_{10} = 200$ °C, pois é fundamental considerar que a temperatura de saída dos gases de exaustão após o trocador de calor não seja excessivamente baixa, pois valores muito reduzidos podem provocar a condensação de compostos presentes nos gases, como

vapor de água e traços de ácidos, resultando em corrosão dos equipamentos e perda de eficiência operacional.

A integração entre a caldeira e o motor de combustão interna foi avaliada com base no balanço energético global do sistema. No ponto (2), a quantificação do consumo de cavaco de eucalipto pela caldeira foi realizada por meio do método direto descrito na norma ASME PTC-4 (2009), conforme Equação (18).

$$\eta_{caldeira} = \frac{Q_{vapor}}{Q_{combustível}} \quad (18)$$

Ressalta-se, entretanto, que na modelagem desenvolvida foi considerado o aporte energético proveniente do cavaco de eucalipto, utilizado diretamente na caldeira, e do biogás, cujo aproveitamento energético ocorre na caldeira de recuperação, de modo que o somatório dessas contribuições resulta na redução da demanda de cavaco.

A produção de água quente a 50 °C foi avaliada por meio da transferência de calor durante o resfriamento do motor, conforme os pontos (11) a (13) ilustrados na FIGURA 8. No ponto (11), a água de processo é introduzida a 25 °C.

É relevante destacar que, ao aproveitar o calor residual do motor para o aquecimento da água, reduz-se a necessidade de gerar água quente pelo processo convencional, no qual o vapor é utilizado como fonte de calor. Essa integração resulta na diminuição da carga da caldeira alimentada com cavacos de eucalipto e, consequentemente, no menor consumo de combustível.

De forma semelhante, Almeida (2018) demonstrou que, para aquecer 100 m³/h de água até 50 °C em um abatedouro, eram requeridos 3,5 t/h de vapor. Ao adotar um sistema de coletores solares planos com 3132 m² de área, foi possível economizar integralmente essa vazão de vapor, atingindo eficiência térmica de 57,2 %. Em escala anual, o sistema proporcionou economia de 1486 toneladas de cavaco, equivalente a 1,5 % do total consumido pela caldeira. Esses resultados reforçam o potencial do aproveitamento de calor residual para reduzir a dependência de vapor e biomassa no processo.

Com base nas informações fornecidas pelo fabricante do MCI, a água de arrefecimento do motor, ponto (12) opera a 90 °C, com vazão mássica de 19,44 kg/s (equivalente a 70 m³/h). A partir desses parâmetros, a energia térmica cedida pelo

motor Q_{disp} (kW) pode ser calculada utilizando o balanço de energia, conforme a Equação (19).

$$Q_{disp} = m_{12} * Cp_{água} * (T_{12} - T_{11}) \quad (19)$$

onde,

$Cp_{água}$ é o calor específico com valor de 4,18 kJ.kg⁻¹.°C⁻¹.

Em seguida, é possível determinar a vazão de água aquecida a 50 °C, considerando que a água de alimentação entra a 25 °C, por meio da Equação (20).

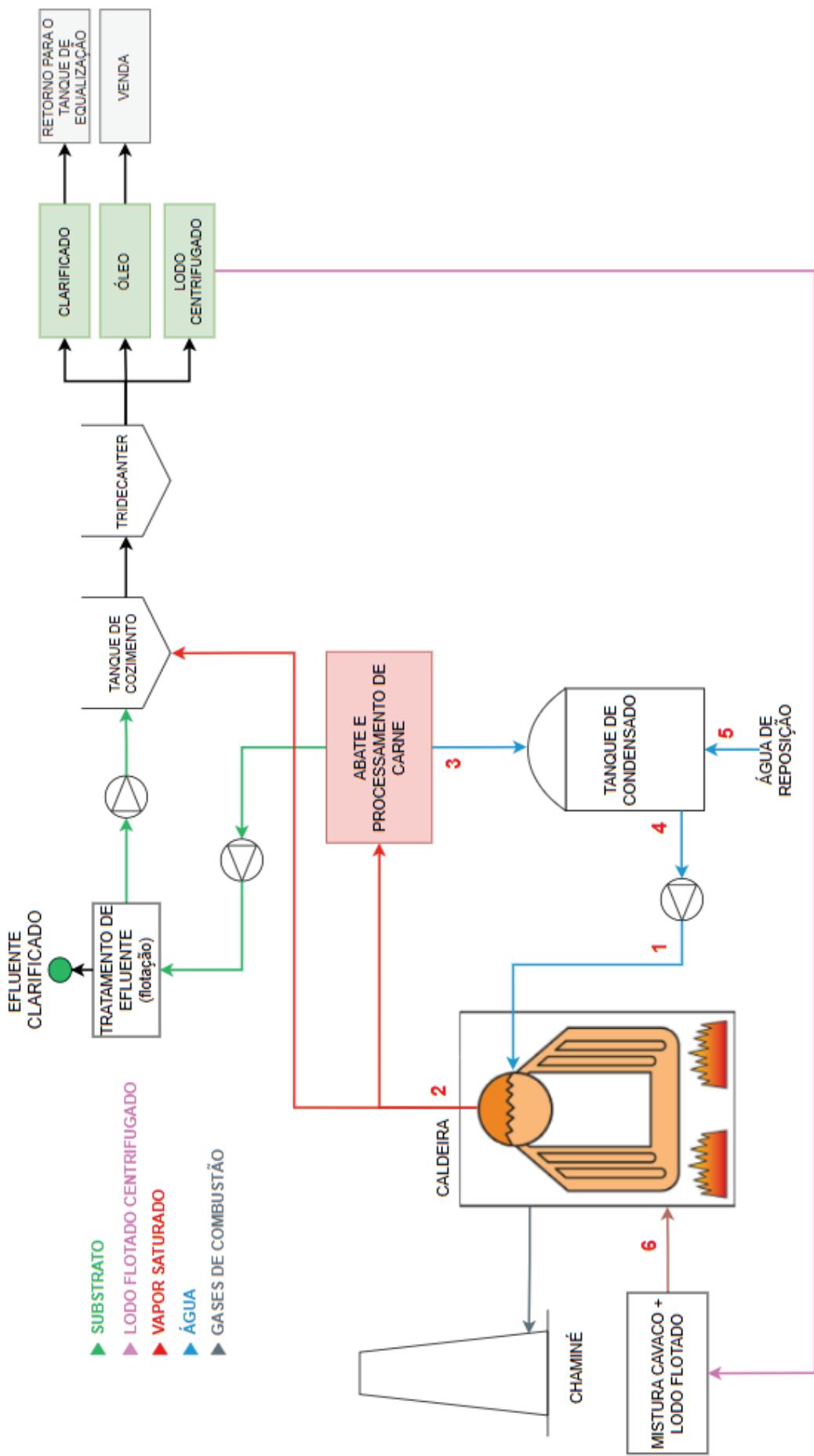
$$m_{11} = \frac{\eta_{trocador} \cdot Q_{disp}}{Cp_{água} * (T_{11} - T_9)} \quad (20)$$

onde considerou-se um trocador de calor isolado, ou seja, com uma eficiência de troca de calor de 100%.

3.3.3 Cenário 3: co-combustão lodo flotado centrifugado e cavaco de eucalipto

No Cenário 3, considerou-se a queima em caldeira de uma mistura de cavaco de eucalipto e lodo flotado centrifugado, com umidade aproximada de 65 %, como combustível alternativo para a geração de vapor e água quente. O objetivo desta análise foi avaliar a potencial redução do consumo de cavaco de madeira, bem como os impactos nos custos associados ao tratamento do efluente agroindustrial, conforme ilustrado na FIGURA 9.

FIGURA 9 – DIAGRAMA DE FLUXO DE PROCESSO DO CENÁRIO 3



FONTE: A autora (2025).

A indústria em estudo apresenta uma geração de 40 t·dia⁻¹ de lodo flotado centrifugado. A proporção de mistura entre o lodo flotado e o cavaco foi definida considerando o limite máximo de 20 %, em conformidade com a Resolução SEMA nº 42 (SEMA, 2008).

Mantovan (2022), realizou a caracterização do lodo flotado e os resultados de análise imediata, elementar e poder calorífico estão apresentados na TABELA 5.

TABELA 5 – CARACTERIZAÇÃO DO LODO FLOTADO CENTRIFUGADO

Parâmetro	Lodo 1	Lodo 2	Lodo 3	Média
Umidade (%)	61,70	64,70	68,66	65,02
H (%)	9,28	9,00	8,91	9,06
PCS (kJ.kg ⁻¹) *	27.890	27.480	27.170	27.513

FONTE: Adaptado de Mantovan, (2022).

Com base nesses dados, adotou-se a média dos valores obtidos, com isso, o poder calorífico inferior do lodo flotado centrifugado foi determinado utilizando a Equação (21) (BAZZO, 1995), sendo os valores de PCS e H corrigidos para base úmida (b.u.).

$$PCI = PCS - 2440 * (9H + U) \quad (21)$$

onde,

PCI é o poder calorífico inferior (b.u.) (kJ.kg⁻¹);

PCS é o poder calorífico superior (b.u.) (kJ.kg⁻¹);

H é o teor de hidrogênio do combustível (b.u.) (kg.kg⁻¹);

U é o teor de umidade (b.u.) (kg.kg⁻¹).

Diante da mistura de lodo flotado e cavaco de eucalipto, tem-se um novo PCI a ser considerado, o qual foi obtido através da Equação (22):

$$PCI_{comb} = \frac{(m_{cavaco} * PCI_{cavaco}) + (m_{lodo} * PCI_{lodo})}{m_{cavaco} + m_{lodo}} \quad (22)$$

A quantidade demandada de cavaco de eucalipto e de lodo flotado é definida pelo método direto, apresentado ela Equação (18) na seção anterior, mantendo a eficiência da caldeira em 87,6 %.

Caso haja excedente de lodo flotado centrifugado, este deverá receber a destinação ambientalmente adequada. Para tal procedimento, a indústria incorre em um custo de R\$ 175,00 por tonelada de lodo, acrescido do valor de transporte de R\$ 1.083,00 por carga, considerando que cada carga corresponde a 8 toneladas.

O efluente clarificado retorna ao tanque de equalização. Ademais, o processo gera receita adicional, uma vez que o óleo recuperado durante o tratamento é comercializado ao valor de R\$ 3,00 por litro.

Para a avaliação operacional do sistema e a análise preliminar de viabilidade, o projeto prevê a aquisição e a instalação de um sistema de alimentação e dosagem do combustível. Quanto aos custos operacionais, incluem-se a manutenção anual da caldeira, bem como a alocação de um operador adicional, responsável pelo controle e monitoramento contínuo do sistema.

3.4 ANÁLISE PRELIMINAR DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A análise de viabilidade econômica representa um fator determinante no processo de tomada de decisão, sobretudo em um contexto marcado pela limitação de recursos e pelo aumento da competitividade no setor industrial.

Para avaliar a viabilidade econômica do aproveitamento energético do lodo flotado proveniente do tratamento de efluentes da indústria de abate e processamento de aves e peixes, tanto por meio da digestão anaeróbia quanto pela sua utilização em mistura com cavaco de eucalipto, foi conduzida uma análise preliminar de viabilidade econômica. Essa avaliação baseou-se nos resultados obtidos a partir das simulações de cada cenário, considerando os respectivos custos de implantação.

O objetivo desta análise é fornecer uma visão preliminar da viabilidade econômica do investimento necessário para implantar as tecnologias propostas em cada cenário, considerando fatores como custos de implantação, operação, manutenção e potenciais receitas geradas.

A análise foi dividida nas seguintes etapas:

- a) Estimativa dos custos de implantação: foram considerados todos os custos iniciais relacionados à implantação das tecnologias de cada

cenário. Isso inclui a instalação dos biodigestores, sistemas de purificação de biogás, motores de combustão interna, sistemas de geração de eletricidade, trocadores de calor e outros equipamentos necessários.

- b) Custos operacionais e de manutenção: foram estimados os custos recorrentes associados à operação e manutenção dos sistemas implantados. Isso inclui despesas com insumos, energia, mão de obra, manutenção preventiva e corretiva, bem como os custos específicos para a operação de equipamentos de purificação de biogás.
- c) Receitas potenciais: foram quantificadas as receitas geradas pela venda de subprodutos resultantes do processo de digestão anaeróbia. Adicionalmente, foram consideradas as economias proporcionadas pela redução do consumo de cavaco e pelos custos de disposição de resíduos.
- d) Análise de fluxo de caixa: com base nos custos e receitas estimados, foi elaborado um fluxo de caixa projetado para cada cenário, ao longo de um horizonte temporal específico. Esse fluxo de caixa permite a avaliação da viabilidade econômica do projeto, considerando o valor presente líquido (VPL), *payback* descontado e a taxa interna de retorno (TIR).

O cálculo do valor presente líquido (VPL), calculado pela Equação (23), considera a equivalência temporal dos fluxos de caixa, de modo a trazer os benefícios futuros e valores residuais para o presente. Dessa forma, permite aos tomadores de decisão mensurarem de forma objetiva os potenciais ganhos ou perdas de um determinado projeto (DAMACENO, 2018).

$$VPL = \sum_{t=0}^j \frac{FC_t}{(1 + i_n)^t} = -FC_0 + \frac{FC_1}{(1 + i_n)^1} + \frac{FC_2}{(1 + i_n)^2} + \dots + \frac{FC_j}{(1 + i_n)^j} \quad (23)$$

onde FC_0 (R\$) representa o investimento inicial ou CAPEX, FC_t corresponde ao fluxo de caixa esperado no período, t (anos) indica o horizonte temporal considerado na análise e i_n (%) refere-se à taxa de desconto nominal aplicada.

Para os cálculos, o valor de i_n foi assumido como equivalente à taxa mínima de atratividade (TMA), a qual expressa o retorno mínimo esperado pelo investidor, sendo considerada constante ao longo de todo o período de análise do projeto.

A taxa interna de retorno (TIR) é definida como a taxa de desconto que torna nulo o valor presente líquido dos fluxos de caixa, conforme apresentado na Equação (24).

$$\frac{FC_1}{(1 + TIR)^1} + \frac{FC_2}{(1 + TIR)^2} + \cdots + \frac{FC_j}{(1 + TIR)^j} - FC_0 = 0 \quad (24)$$

A taxa interna de retorno (TIR) representa uma estimativa da rentabilidade do projeto, expressa em termos percentuais. Em outras palavras, trata-se da taxa máxima de remuneração que o empreendimento pode oferecer sem gerar prejuízos. Assim, quando a TIR é superior ao custo do capital ou aos recursos empregados no financiamento do projeto, há indicação de viabilidade econômica; caso contrário, o investimento apresenta *déficit*.

A comparação entre a TIR e a TMA constitui, portanto, um critério fundamental para a tomada de decisão: projetos com TIR maior que a TMA são considerados viáveis, ao passo que aqueles com TIR inferior à TMA tendem a ser rejeitados.

O Payback é um indicador financeiro que representa o tempo necessário para que o investimento inicial de um projeto seja recuperado por meio dos fluxos de caixa gerados. Neste estudo, utiliza-se o Payback Descontado, que considera o valor temporal do dinheiro, ou seja, ajusta os fluxos de caixa futuros pela taxa de desconto aplicada, incorporando fatores como inflação e custo de oportunidade do capital.

Este método é particularmente relevante em projetos com níveis significativos de risco, pois evidencia o período durante o qual o capital do investidor permanece exposto, permitindo uma avaliação mais realista da viabilidade financeira e da segurança do investimento. Além disso, o payback descontado auxilia na comparação entre alternativas de investimento, contribuindo para a tomada de decisão em contextos de incerteza econômica.

No presente trabalho, os fluxos de caixa foram projetados em valores reais, ou seja, sem a inclusão de efeitos inflacionários. Dessa forma, tornou-se necessário calcular a taxa de desconto real (TMA real) a partir da taxa nominal de atratividade, que considera a taxa de juros básica da economia (SELIC) acrescida de um prêmio

de risco. Para a conversão da taxa nominal em taxa real, utilizou-se a equação de Fisher, Equação (25), que relaciona a taxa de desconto nominal, a taxa de inflação e a taxa de desconto real:

$$r = \frac{1 + i}{1 + f} - 1 \quad (25)$$

onde,

r é a taxa real de desconto (TMA real);

i é a taxa nominal de desconto (TMA nominal);

f é a taxa de inflação esperada.

A taxa nominal de desconto adotada foi de 20 % ao ano, valor definido com base na taxa SELIC sendo 15 %, acrescida de um prêmio de risco de 5 %, considerando a natureza do investimento, conforme decisão do Comitê de Política Monetária – Banco Central do Brasil (2025a). Já a taxa de inflação considerada foi de 5,96% ao ano, correspondente à média do IPCA dos últimos cinco anos, conforme Banco Central do Brasil (2025b). Com a aplicação da equação de Fisher, obteve-se uma taxa de desconto real de 13,25 % ao ano, valor utilizado nos cálculos de Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Payback Descontado para a avaliação da viabilidade econômica dos cenários simulados.

Por fim, foi realizada uma comparação entre os três cenários propostos, destacando os aspectos econômicos que tornam cada um deles mais ou menos viável em termos financeiros. A análise preliminar buscou identificar o cenário que oferece o melhor equilíbrio entre custos, receitas e retorno sobre o investimento, levando em conta a viabilidade técnica e as vantagens ambientais de cada alternativa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentados os resultados obtidos durante a realização da pesquisa, levando em consideração os objetivos estabelecidos previamente.

Inicialmente, serão abordados os resultados do cenário base, o qual utiliza a queima direta de cavacos de eucalipto em uma caldeira para a geração de vapor saturado. Esse cenário serve como parâmetro de comparação com os cenários propostos.

Posteriormente, serão abordados os resultados da estimativa de produção de biogás gerado a partir do lodo flotado. Esses resultados de produção de biogás foram utilizados para avaliação dos cenários 1 e 2.

E por fim, serão apresentados os resultados dos três cenários propostos, cada um com uma abordagem específica para a utilização do lodo flotado: produção e utilização de biogás em combustão direta na caldeira gerando vapor saturado e água quente; produção e uso do biogás em um motor de combustão interna para a produção simultânea de vapor, água quente e eletricidade; e a mistura de lodo flotado centrifugado com cavaco de eucalipto e queima em caldeira para geração de vapor saturado e água quente.

Cada cenário foi analisado em termos de uma análise preliminar de viabilidade econômica, com comparações diretas ao cenário base.

4.1 CENÁRIO BASE

O cenário base representa a situação atual do processo produtivo, no qual a geração de vapor e água quente ocorre a partir da queima exclusiva de cavaco de eucalipto em uma caldeira flamotubular. Este sistema é responsável pelo fornecimento de energia térmica utilizada em diferentes etapas do processo industrial.

As condições operacionais consideradas foram: pressão de operação de 10 bar, título do vapor igual a 1, eficiência da caldeira igual a 87,6 % e vazão média de vapor requerida de 22 t.h^{-1} . Essas variáveis servem como base de comparação para os cenários alternativos propostos.

A partir da aplicação dos balanços de massa e energia, foi possível calcular o consumo de cavaco necessário para atender à demanda de vapor. Os resultados indicaram que o consumo médio de cavaco é de $6,1 \text{ t.h}^{-1}$, o que corresponde a

aproximadamente 38.567 toneladas ao ano, considerando uma operação de 22 dias ao mês.

Almeida (2018), avaliou o consumo de cavaco para a geração de 40 t.h⁻¹ de vapor saturando, resultando em um consumo de 10,9 t.h⁻¹ de cavaco, enquanto no presente estudo, para uma geração de 22 t.h⁻¹ de vapor, o consumo determinado foi de 6,1 t.h⁻¹. Essa relação demonstra que, apesar das diferenças de escala e das condições operacionais específicas de cada caso, os valores encontrados estão proporcionais.

Considerando que a planta opere por 22 dias ao mês, foram estimados os consumos e os custos relacionados à demanda de cavaco, conforme demonstrados na TABELA 6.

TABELA 6 – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DE GERAÇÃO DE VAPOR DO CENÁRIO BASE

Parâmetros	Valor
Consumo de cavaco (t. d ⁻¹)	146,08
Consumo de cavaco (t. ano ⁻¹)	38.567,23
Custo do cavaco (R\$. d ⁻¹)	43.826,40
Custo do cavaco (R\$. ano ⁻¹)	11.570.169,60
Energia disponibilizada pelo cavaco (kJ. d ⁻¹)	1,514x10 ⁹
Energia disponibilizada pelo vapor (kJ. d ⁻¹)	1,326x10 ⁹

FONTE: A autora (2025).

Anualmente, o valor gasto com a compra de cavaco para suprir a demanda da indústria é de R\$ 11.570.169,60 por ano. Esse dado servirá como base para análise preliminar de viabilidade econômica dos cenários propostos. Além disso, foi determinada a energia disponibilizada pelo cavaco sendo 1,514x10⁹ kJ.dia⁻¹ e, com base na eficiência da caldeira, há uma energia disponibilizada pelo vapor a planta de 1,326x10⁹ kJ.dia⁻¹.

No cenário base, a água quente é gerada a partir da energia térmica fornecida pela queima de cavacos. Com base nas operações diárias, foi determinado que o consumo total de água quente é de 127 m³.h⁻¹ e para atender a essa demanda, são necessários 3,195x10⁸ kJ.dia⁻¹.

Esse valor corresponde a 24,08 % de toda energia disponibilizada pelo cavaco. Diante disso, determinou-se que, para atender essa demanda, são consumidas 35,17 toneladas de cavacos por dia, o que representa um custo diário de R\$ 10.551,00. Esse consumo evidencia a forte dependência da planta industrial em

relação ao cavaco como principal fonte de energia, ressaltando a importância de estratégias de otimização do uso de cavacos para reduzir custos operacionais e impactos ambientais. Os resultados do sistema de aquecimento de água são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

RESULTADOS OBTIDOS PARA O SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA DO CENÁRIO BASE

Parâmetro	Valor
Vazão de água consumida a 50°C ($m^3.h^{-1}$)	127
Vazão de vapor requerida ($t.h^{-1}$)	6,048
Valor correspondente de cavaco ($t.dia^{-1}$)	35,17
Custo correspondente ($R\$.dia^{-1}$)	10.551,00

FONTE: A autora (2025).

No estudo de Almeida (2018), houve a análise da implantação de coletores solares para fornecer, na condição de projeto, $100\ m^3.h^{-1}$ de água quente a 50 °C, sendo necessária uma área de $3.132\ m^2$ de coletores com eficiência térmica de 57,2 %, trazendo uma economia de $3,5\ t.h^{-1}$ de cavaco. Entretanto, a dependência da radiação solar e a necessidade de sistemas de armazenamento tornam imprescindível o apoio de fontes convencionais, e aumentar a área de coletores sem armazenamento adicional não é vantajoso. Dessa forma, Almeida (2018) conclui que o uso de coletores solares não se configura como uma alternativa viável para a geração de água quente na indústria analisada.

Outro processo que gera custos relevantes para a indústria é o tratamento de efluentes. Após a flotação, que promove a separação do lodo flotado e o efluente clarificado, é realizado o cozimento do lodo flotado. Esse procedimento utiliza vapor saturado, o que impacta diretamente no consumo de cavaco.

Foi calculado o calor necessário para o cozimento dos $792\ m^3$ de lodo flotado gerado por dia, resultando em $2,015 \times 10^8\ kJ.dia^{-1}$ proveniente da caldeira. Esse calor foi utilizado para aquecer o lodo até a temperatura de 95 °C, o que representa 15,19 % de toda energia disponibilizada diariamente pelo cavaco, ou seja, $22,17\ t.dia^{-1}$. Já em termos financeiros isso representa R\$ 6.651,00 por dia.

A próxima etapa do tratamento do lodo flotado é a centrifugação, onde adotou-se um tridecanter de 45 kW para estimar a energia elétrica gasta no processo, resultando em $1.080\ kWh.dia^{-1}$, em operação contínua, e um custo de R\$ 453,60 por

dia. Ao final do processo, obtém-se 3 subprodutos: lodo centrifugado, óleo e efluente clarificado.

A destinação adequada do lodo centrifugado acarreta custos relacionados ao transporte e à destinação final, resultando em uma despesa diária de R\$ 12.415,00. No entanto, a centrifugação possibilita a geração de receita significativa com a venda do óleo derivado do processo, alcançando um valor de R\$ 18.000,00 por dia. Esses dados serão avaliados posteriormente na seção de análise preliminar de viabilidade.

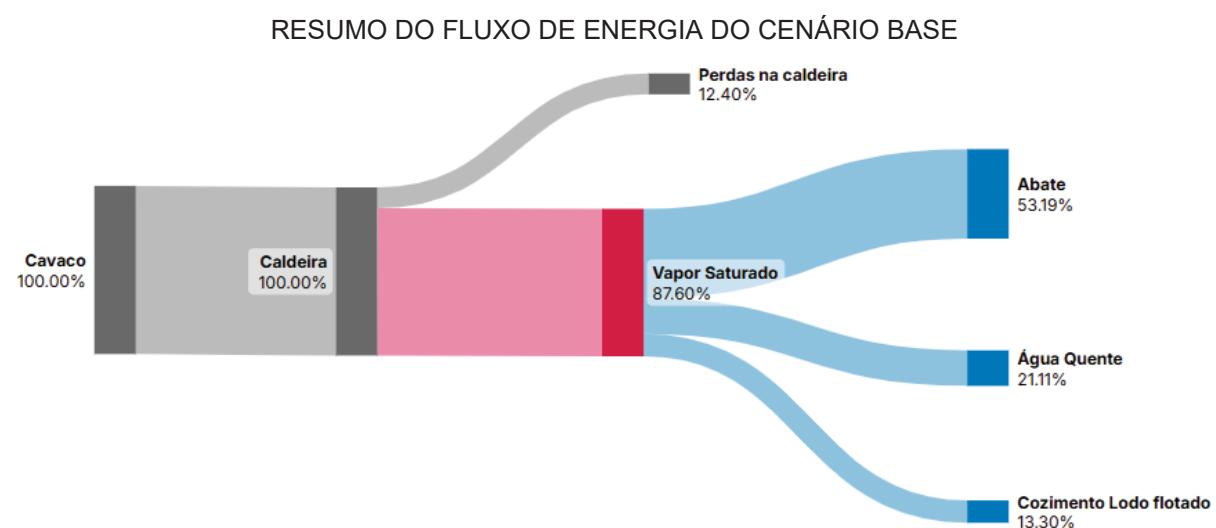
Na Erro! Fonte de referência não encontrada., são apresentados os custos de destinação e de receita de cada subproduto.

CUSTOS E RECEITAS OBTIDOS NO TRATAMENTO DO LODO FLOTADO

Processo	Custo (R\$.dia ⁻¹)	Receita (R\$.dia ⁻¹)
Cozimento	6.651,00	
Centrifugação	453,60	-
Transporte do lodo flotado	5.415,00	-
Destinação do lodo flotado	7.000,00	-
Destinação do clarificado	-	-
Venda do óleo	-	18.000,00

FONTE: A autora (2025).

Na Erro! Fonte de referência não encontrada. é apresentado um resumo dos resultados obtidos na simulação do cenário base para um dia de operação.



FONTE: A autora (2025).

Com base nos resultados apresentados, foi elaborada a TABELA 7 com os principais indicadores técnicos e econômicos do cenário base, permitindo visualizar de forma consolidada o desempenho do sistema.

TABELA 7 - BALANÇO GLOBAL DO CENÁRIO BASE

Indicador Econômico	Valor Obtido
Vazão de vapor gerado (t.dia ⁻¹)	146,01
Pressão do vapor saturado (bar)	10
Eficiência da caldeira (%)	87,6
Consumo de cavaco (t.h ⁻¹)	6,087
Energia disponibilizada pelo cavaco (kJ.dia ⁻¹)	1,514x10 ⁹
Consumo de cavaco (t.dia ⁻¹)	146,08
Consumo de cavaco (t.ano ⁻¹)	38.567,23
Custo de cavaco (R\$.ano ⁻¹)	11.570.169,60
Consumo de água quente (m ³ .h ⁻¹)	127
Energia necessária para água quente (kJ.dia ⁻¹)	3,195x10 ⁸
Volume de efluente tratado (m ³ .dia ⁻¹)	14.880
Produção de lodo flotado (m ³ .dia ⁻¹)	792
Custo do cozimento do lodo (R\$.ano ⁻¹)	1.755.864,00
Custo de centrifugação do lodo (R\$.ano ⁻¹)	119.750,40
Custo de destinação do lodo centrifugado (R\$.ano ⁻¹)	3.277.560,00
Receita com óleo recuperado (R\$.ano ⁻¹)	4.752.000,00

FONTE: A autora (2025).

O cenário base demonstra o elevado consumo de cavaco para a produção de vapor, refletindo diretamente nos custos operacionais da indústria. Além disso, os gastos relacionados à destinação do lodo centrifugado representam um passivo econômico e ambiental significativo.

Apesar desses pontos, os resultados obtidos se mostraram coerentes com dados da literatura. Esse cenário inicial, portanto, serve como referência para a análise dos cenários alternativos, nos quais se busca reduzir o consumo de biomassa, aproveitar energeticamente o lodo flotado e melhorar a viabilidade econômica do processo.

4.2 DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR E ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Nesta seção são apresentados os resultados do dimensionamento do biodigestor e da estimativa de produção de biogás a partir do lodo flotado gerado diariamente no processo industrial.

Esses resultados constituem a base para a avaliação energética e econômica dos Cenários 1 e 2. A análise foi realizada considerando os parâmetros operacionais definidos na Seção 3.2, com base no rendimento de geração de metano por sólidos voláteis removidos, obtidos por Fagnani (2023).

O sistema proposto foi dimensionado com quatro biodigestores do tipo CSTR BR, cada um com capacidade total de 4.000 m³, totalizando 16.000 m³ de volume útil. Adotou-se um tempo de retenção hidráulica (TRH) de 20 dias. Considerando a alimentação diária de 792 m³ de lodo flotado, com teor médio de sólidos voláteis removidos de 39,62 g.L⁻¹, rendimento de metano por sólidos voláteis removido de 310,95 mLCH₄.g⁻¹SV_{rem} e volume efetivo de trabalho dos reatores foi de 15.840 m³.

A partir dos cálculos de rendimento, obteve-se uma geração estimada de 9.757 m³.dia⁻¹ de metano, correspondente a um potencial de produção de 15.667 m³.dia⁻¹ de biogás, assumindo um teor médio de metano de 62,28 %, conforme reportado por Fagnani (2023). A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta os principais parâmetros do dimensionamento e os resultados obtidos.

DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA E ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Parâmetro	Valor
Vazão de substrato (m ³ .dia ⁻¹)	792
TRH (dias)	20
Volume total de reatores (m ³)	16.000
Número de reatores (un)	4
Rendimento de metano por sólidos voláteis removido (R _{CH₄}) (mLCH ₄ .g ⁻¹ SV _{rem})	310,95
Volume de metano gerado (m ³ .dia ⁻¹)	9.757
Teor de metano (%)	62,28
Volume de biogás gerado (m ³ .dia ⁻¹)	15.667

FONTE: A autora (2025).

A produção de biogás estimada na simulação computacional apresentou valores consistentes quando comparados aos resultados de Fagnani (2023). O autor, em ensaio experimental com reator CSTR de bancada de 16L, obteve uma produção diária de 13.703 mL de biogás, com teor médio de metano de 62,28%. Na presente simulação, o volume diário de biogás foi de 15.667 m³, correspondendo a 9.757 m³ de metano por dia.

Do ponto de vista operacional, o sistema foi projetado para incluir etapas complementares de desumidificação e compressão do biogás, visando garantir sua qualidade e segurança no uso.

Cada biodigestor conta com agitadores para homogeneização adequada do substrato, além de instrumentação para monitoramento contínuo da qualidade do biogás. Estão previstos ainda sistemas auxiliares, como *flare* de segurança, analisadores de biogás em tempo real e infraestrutura civil para instalação dos reatores, totalizando em um custo de implantação de R\$ 15.576.000,00.

4.3 CENÁRIO 1

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos com a implementação do Cenário 1, onde o biogás, gerado através do lodo flotado, é destinado a um queimador do tipo duobloco, acoplado à caldeira, permitindo a operação conjunta ou alternada com o cavaco de eucalipto.

A análise foi conduzida considerando os parâmetros operacionais previamente definidos, incluindo o poder calorífico do biogás e do cavaco de eucalipto e a eficiência da caldeira.

A eficiência da caldeira com a queima de biogás foi considerada equivalente à do cavaco, sendo 87,6 %, uma vez que a adaptação do queimador tipo duobloco é projetada para manter condições de combustão adequadas. A demanda de vapor manteve-se inalterada em relação ao Cenário Base, de 22 t.h⁻¹.

Para a determinar a quantidade de cavaco reduzida foi realizado um balanço energético na caldeira, onde os resultados obtidos são apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

COMPARAÇÃO DA REDUÇÃO DE CAVACO DO CENÁRIO 1

Parâmetro	Cenário Base	Cenário 1
Consumo de cavaco (t.dia ⁻¹)	146,08	115,8
Consumo de cavaco (t.ano ⁻¹)	38.567,23	30.571,2
Custo de cavaco (R\$.dia ⁻¹)	43.824,00	34.740,00
Custo de cavaco (R\$.ano ⁻¹)	11.569.536,00	9.171.360,00

FONTE: A autora (2025).

A utilização parcial do biogás em substituição ao cavaco de eucalipto resultou em uma economia de 30,28 toneladas de cavaco por dia, totalizando aproximadamente 7.994 toneladas anuais. Dessa forma, o consumo anual de cavaco no Cenário 1 foi reduzido para 30.571,2 toneladas, em comparação às 38.567,23

toneladas observadas no Cenário Base. Essa redução corresponde a uma economia anual de R\$ 2.398.809,60, representando uma diminuição de 20,7% nos custos relacionados ao consumo de cavaco.

A energia térmica disponibilizada pelo biogás foi estimada em aproximadamente $3,51 \times 10^8 \text{ kJ} \cdot \text{dia}^{-1}$. Considerando a eficiência da caldeira de 87,6%, o aproveitamento útil corresponde a $3,07 \times 10^8 \text{ kJ} \cdot \text{dia}^{-1}$, valor que representa cerca de 20,2 % da energia total fornecida pelo cavaco no Cenário Base. Assim, a integração de um sistema de combustão de biogás à caldeira proporciona um ganho energético significativo, contribuindo para a diversificação da matriz de combustíveis e para a maior eficiência global do processo.

Segundo Antunes (2019), 1 m³ de biogás equivale a 1,536 kg de lenha. Neste trabalho, a conversão de 1 m³ de biogás gerou a redução de 1,932 kg de cavaco de eucalipto. Essa diferença pode ser atribuída a vários fatores, incluindo a eficiência da caldeira e as características específicas do cavaco de eucalipto, como o poder calorífico.

No estudo de Fagnani (2023), foi relatado que a utilização do lodo flotado na biodigestão anaeróbia apresenta maior disponibilidade de substrato energético, em relação a codigestão com lodo ativado, por ser rico em lipídios e proteínas, resultando em um elevado potencial de produção de biogás e metano. Contudo, essa condição também evidenciou desvantagens significativas, como o acúmulo de ácidos graxos de cadeia curta e amônia livre em concentrações inibitórias, que comprometeram a estabilidade operacional do sistema e resultaram em queda na produção de metano, tornando o processo menos eficiente.

Antunes (2019), avaliou a viabilidade da implementação de um sistema de combustão de biogás em substituição à lenha em caldeiras flamotubulares. Apesar de serem necessárias adaptações na câmara de combustão para integrar o novo sistema, o estudo comprovou sua viabilidade técnica. A análise do retorno sobre o investimento, realizada por meio do método de *payback* descontado, indicou um prazo de recuperação entre o segundo e o terceiro ano, revelando-se mais vantajoso em comparação à alternativa de comercialização do biogás.

Os custos de implementação do sistema contemplam tanto a instalação de um biodigestor completo, responsável pelo tratamento do lodo flotado e pela geração de biogás, quanto as adequações necessárias na caldeira, incluindo a instalação do queimador e as adaptações estruturais na fornalha para viabilizar a combustão do

novo combustível. A TABELA 8 apresenta os investimentos para a implantação do Cenário 1.

TABELA 8 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DO CENÁRIO 1

Parâmetro	Valor (R\$)
Biodigestor completo	15.576.000,00
Melhorias na caldeira (queimador e adaptações na fornalha)	722.000,00

FONTE: A autora (2025).

Esses investimentos iniciais representam um montante relevante, porém estratégico, uma vez que possibilitam a substituição parcial do cavaco de eucalipto por biogás, reduzindo os custos operacionais ao longo do tempo.

4.4 CENÁRIO 2

No Cenário 2, o biogás obtido por meio da biodigestão anaeróbia do lodo flotado é direcionado para a alimentação de um motor de combustão interna (MCI).

Um motor, acoplado a um gerador, tem como principal finalidade a produção de energia elétrica. Entretanto, no Cenário 2 o sistema é configurado para operar em regime de cogeração, de forma que a energia térmica dos gases de exaustão e do sistema de arrefecimento do motor seja recuperada e utilizada na geração de vapor e no aquecimento de água até 50 °C, respectivamente.

Dessa forma, o motor de combustão interna atua de maneira complementar à caldeira, reduzindo a dependência do cavaco de eucalipto para suprimento de vapor, mas também atua na redução da compra de eletricidade da concessionária.

Nesse contexto, os gases de exaustão do motor são liberados a uma temperatura de 470 °C e vazão de 6.560 kg.h⁻¹, permitindo a geração de vapor saturado a uma taxa de 0,8 t.h⁻¹. Essa configuração proporciona uma redução de aproximadamente 5,13 t.dia⁻¹ no consumo de cavaco de eucalipto pela caldeira, resultando em uma economia diária de R\$ 1.538,22 e anual de R\$ 406.090,71.

Além disso, a recuperação de calor proveniente do circuito de arrefecimento do motor permitiu a geração de aproximadamente 112 m³ por hora de água quente a 50 °C. No entanto, ainda se faz necessário um suprimento adicional de 0,378x10⁸ kJ por dia para atender integralmente à demanda de água quente, o que corresponde ao

consumo de 3,64 toneladas diárias de cavaco, resultando em um custo de R\$ 1.092,00 por dia e R\$ 288.288,00 por ano.

A TABELA 9, apresenta a economia gerada de cavaco para a geração de vapor e para o aquecimento de água quente por meio do processo de arrefecimento do motor.

TABELA 9 – COMPARAÇÃO DA REDUÇÃO DE CAVACO DO CENÁRIO 2

Parâmetro	Cenário Base	Cenário 2
Consumo de cavaco para a geração de vapor (t.dia ⁻¹)	146,08	137,31
Consumo de cavaco (t.ano ⁻¹)	38.567,23	30.571,2
Custo de cavaco (R\$.dia ⁻¹)	43.824,00	41.193,00
Custo de cavaco (R\$.ano ⁻¹)	11.569.536,00	10.874.952,00

FONTE: A autora (2025).

Observa-se que o processo de aquecimento de água quente por meio do processo de arrefecimento do motor gerou uma economia de consumo de cavaco 88,18 %, reduzindo o custo anual de compra de cavaco de R\$ 2.440.944,00 para R\$ 288.288,00.

Almeida (2018), mostrou que aquecer 100 m³.h⁻¹ de água a 50 °C demandava 3,5 t.h⁻¹ de vapor. A instalação de 3132 m² de coletores solares planos supriu totalmente essa demanda, com eficiência térmica de 57,2 %, economizando 1.486 t de cavaco por ano, cerca de 1,5 % do consumo da caldeira.

No que se refere à produção de eletricidade, o conjunto motor-gerador apresentou uma geração diária de 30.587 kWh, resultando em uma economia estimada de R\$ 12.846,54 por dia, o que corresponde a aproximadamente R\$ 3.391.486,56 por ano. Embora este estudo não tenha como objetivo analisar em detalhe a redução percentual no consumo de energia elétrica da indústria, os valores obtidos são utilizados na análise preliminar de viabilidade.

De forma integrada, a operação do MCI em regime de cogeração resultou em um expressivo ganho energético, visto que a mesma quantidade de biogás possibilitou o atendimento simultâneo a diferentes demandas da planta industrial, como: geração elétrica, suprimento de vapor saturado e produção de água quente. A produção de vapor saturado a partir do calor dos gases de exaustão contribuiu para uma redução de 3,51 % no consumo de cavaco de eucalipto, enquanto a recuperação térmica do circuito de arrefecimento gerou uma economia ainda mais significativa no

aquecimento de água, reduzindo em 88,18 % a necessidade de cavaco destinada a essa finalidade.

Em termos econômicos, a implementação desse cenário requer investimentos na aquisição e instalação do biodigestor, instalação do motor de combustão interna acoplado a um gerador e nos sistemas auxiliares de recuperação térmica. Esse investimento é apresentado na TABELA 10.

TABELA 10 – CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO DO CENÁRIO 2

Parâmetro	Valor (R\$)
Biodigestor completo*	15.576.000,00
Grupo motogerador*	3.507.478,23
Trocador de calor (gases de exaustão)**	1.100.000,00
Trocador de calor (aquecimento de água)**	480.000,00

FONTE: A autora (2025).

Legenda: * Custo orçado em empresas da região; ** Custo estimado.

O custo total estimado para a implantação do sistema do Cenário 2 é de R\$ 20.663.478,23, valor que contempla o biodigestor completo, grupo motogerador e os trocadores de calor dos gases de exaustão e para aquecimento da água.

LOYOLA et al. (2022), realizaram uma análise sobre a substituição de um sistema a vapor de aproximadamente 1 MW elétrico por três motores de combustão interna de 1 MW elétrico cada, em uma central termelétrica, visando à recuperação do calor residual proveniente dos gases de exaustão e da água de resfriamento. O balanço energético demonstrou que 34 % da energia proveniente do biogás foi convertida em eletricidade, enquanto 49,8 % foram dissipadas como perdas nos gases de exaustão (25,2 %) e na água de resfriamento (24,6 %). Os resultados evidenciam um potencial de cogeração próximo a 84 %.

A avaliação a viabilidade técnica e econômica de um sistema de trigeração baseado em motores de combustão interna alimentados por gás natural foi realizado por Alcântara (2019), com aproveitamento dos gases de exaustão para geração de vapor saturado em caldeira de recuperação e acionamento de chillers de absorção. A análise revelou que cenários de trigeração completa resultaram em VPL negativo; contudo, a aplicação do motor em conjunto com a caldeira de recuperação para a produção de vapor apresentou melhor desempenho financeiro, registrando VPL de R\$ 1.016.000,00, TIR de 110,26 % e payback de 3,4 anos. Esses resultados evidenciam

que o aproveitamento do calor dos gases de exaustão representa uma alternativa estratégica relevante para indústrias com demanda contínua de vapor e refrigeração.

4.5 CENÁRIO 3

No Cenário 3 foi considerada a utilização de uma mistura composta por cavaco de eucalipto e lodo flotado centrifugado como combustível alternativo para a geração de vapor em caldeira. O lodo flotado, proveniente do tratamento de efluentes da indústria, foi submetido previamente a um processo de cozimento e centrifugação, a fim de reduzir seu teor de umidade para cerca de 65 %. Diante disso, nessas etapas o custo do processo permanece o mesmo do Cenário Base.

Com a adoção da proporção de mistura entre os combustíveis de 20 % de lodo flotado e 80 % de cavaco de eucalipto, em massa, em conformidade com a Resolução SEMA nº 42 (SEMA, 2008), o poder calorífico do combustível resultou em 9.862 kJ.kg⁻¹.

Mantovan (2022), verificou que a adição de lodo até 15 % resultou em incremento da eficiência térmica da caldeira, atribuída à redução das perdas de energia nos gases de combustão. Além disso, observou-se que todas as proporções avaliadas, sendo de 0 % a 20 % de lodo flotado, mantiveram as emissões de CO, NO e SO₂ dentro dos limites ambientais estabelecidos, indicando que a co-combustão não comprometeu a qualidade dos gases emitidos. Porém, algumas desvantagens foram observadas a partir da análise elementar do lodo, em que os teores de enxofre e nitrogênio são superiores aos do cavaco, o que aumenta o risco de corrosão e incrustação nas superfícies da caldeira.

Nessa configuração, o consumo diário de cavaco foi reduzido para 127,97 t.dia⁻¹, representando uma economia de 12,35 % em relação com o Cenário Base, conforme dados apresentados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

ECONOMIA DE CAVACO NO CENÁRIO 3

Parâmetro	Cenário Base	Cenário 3
Consumo de cavaco (t.dia ⁻¹)	146,08	127,97
Custo de cavaco (R\$.dia ⁻¹)	43.824,00	38.391,00
Custo de cavaco (R\$.ano ⁻¹)	11.569.536,00	10.135.224,00

FONTE: A autora (2025).

Entretanto, devido a limitação da proporção de mistura, não foi possível utilizar integralmente o lodo flotado disponível. Das 40 toneladas geradas diariamente, permaneceu um excedente de $14,41 \text{ t.dia}^{-1}$, que deverá ser direcionado para o processo de tratamento.

Considerando um custo de R\$ 175,00 por tonelada para destinação do lodo tratado e R\$ 1.083,00 por carga para transporte até o local adequado, esse volume corresponde a uma despesa diária de aproximadamente R\$ 4.470,89. Em termos anuais, o valor acumulado atinge R\$ 1.180.314,96. Embora não elimine totalmente as despesas de destinação e transporte, a redução obtida é significativa, configurando-se como um benefício econômico adicional do aproveitamento energético do lodo flotado.

Assim, ainda que a co-combustão contribua para reduzir em parte o consumo de cavaco e proporcione ganhos ambientais com o aproveitamento de um resíduo industrial, a presença desse excedente gera custos adicionais que precisam ser incorporados à análise de viabilidade econômica do cenário.

Porém, além da redução parcial no consumo de cavaco, o Cenário 3 apresenta uma outra vantagem adicional associada à valorização do lodo flotado por meio da venda de óleo. Esse subproduto, gerado após o processo de centrifugação do lodo flotado, ao ser comercializado, gera receita para a indústria, resultando em um ganho anual estimado de R\$ 4.752.000,00, tal como já apresentado no Cenário Base. Esse retorno contribui para compensar parte dos custos relacionados ao tratamento do excedente de lodo, fortalecendo a viabilidade econômica do Cenário 3.

De maneira geral, o Cenário 3 demonstra-se como uma alternativa viável, pois a queima da mistura no sistema resultou na produção de vapor saturado destinado ao atendimento das demandas térmicas da planta industrial. Além disso, a inserção do lodo flotado como fração substitutiva do cavaco contribuiu para a redução parcial do consumo de cavaco, da valorização energética do resíduo industrial e da geração de receita adicional com a comercialização do óleo centrifugado.

Entretanto, a limitação regulatória que restringe a proporção de mistura a 20 % impede o aproveitamento integral do resíduo, resultando em um excedente significativo que deve ser destinado ao tratamento convencional, gerando custos anuais expressivos.

Com base nos resultados apresentados, foi elaborada a TABELA 11 com os principais indicadores técnicos e econômicos do cenário base, permitindo visualizar de forma consolidada o desempenho do sistema.

TABELA 11 - BALANÇO GLOBAL DO CENÁRIO 3

Indicador econômico	Valor obtido
Consumo de cavaco (t.dia ⁻¹)	95,44
Consumo de cavaco (t.ano ⁻¹)	25.196,16
Custo de cavaco (R\$.ano ⁻¹)	7.558.848,00
Custo do cozimento do lodo (R\$.ano ⁻¹)	1.755.864,00
Custo de centrifugação do lodo (R\$.ano ⁻¹)	119.750,40
Produção de lodo flotado centrifugado (t.dia ⁻¹)*	40
Quantidade de lodo flotado misturado (t.dia ⁻¹)	19,09
Custo de destinação do lodo centrifugado excedente (R\$.ano ⁻¹)	1.713.550,08
Receita com óleo recuperado (R\$.ano ⁻¹)	4.752.000,00

FONTE: A autora (2025).

Legenda: * Dado fornecido pela indústria analisada.

A adoção desse cenário gera pequenas modificações na planta industrial, sendo considerado apenas o investimento de um sistema de alimentação e dosagem do combustível misto, composto por: rosca transportadora dupla, silo homogeneizador com misturador rotativo, inversor de frequência e sensores de vazão e painel de controle dedicado, totalizando em um custo estimado de R\$ 400.000,00.

A viabilidade da co-combustão em caldeira utilizando lodo flotado proveniente de estação de tratamento industrial em mistura com cavaco de eucalipto foi avaliada por Machado (2021). Nesse estudo considerou a queima de 20 % em massa de lodo flotado associado a 80 % de cavaco de eucalipto, resultando em uma redução de 23,7 % no consumo de cavaco pela caldeira, além da diminuição do custo por tonelada de vapor em R\$ 9,20. Observou-se, como desvantagem, o elevado teor de cinzas do lodo, que contribui para o aumento na geração de resíduos. Sob a perspectiva econômica, o projeto apresentou um payback simples de 34 meses, TIR de 27 % (superior à taxa mínima de atratividade) e VPL positivo, sendo, portanto, considerado economicamente viável.

Silva et al. (2025) realizaram um estudo sobre a co-combustão de lodo de esgoto, proveniente de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETA) de uma empresa de saneamento, e carvão mineral em um combustor de leito fluidizado borbulhante em escala de bancada, com potência térmica aproximada de 4,5 kW. A

caracterização da amostra composta por 100 % de lodo, previamente seco até atingir 11,10 % de umidade higroscópica, demonstrou seu relevante potencial energético, apresentando poder calorífico de 16,276 MJ/kg, valor superior ao da amostra de carvão mineral puro (1,25 % de umidade higroscópica), que atingiu 15,486 MJ/kg.

Nesse estudo, a incorporação do lodo de esgoto ao carvão mineral resultou em redução do teor de cinzas em comparação ao carvão mineral isolado. Adicionalmente, os autores ressaltaram a necessidade de reduzir o teor de umidade do lodo para níveis adequados, a fim de viabilizar seu transporte no alimentador até a câmara de combustão.

4.6 ANÁLISE PRELIMINAR DE VIABILIDADE

A análise comparativa entre os três cenários propostos evidencia diferentes estratégias de valorização energética do lodo flotado, redução do consumo de cavaco de eucalipto e impacto econômico para a planta industrial, quando confrontados ao cenário base.

Cada rota tecnológica analisada apresentou vantagens específicas, mas também limitações que devem ser consideradas na tomada de decisão, por isso, foi realizado uma análise de pré-viabilidade econômica para cada o cenário avaliado.

O CAPEX, calculado no Cenário 1, comprehende o valor do biodigestor completo, queimador e adaptações na fornalha. Já para o Cenário 2, foi considerado o biodigestor completo, grupo motogerador e trocadores de calor para o sistema de exaustão e arrefecimento do motor. E no Cenário 3, foi considerado apenas o investimento do sistema de alimentação e dosagem do combustível misto. Em todos os cenários os custos para implementação do projeto e construção já estão considerados em cada item.

O OPEX de cada cenário inclui os custos anuais de operação e manutenção, o que inclui mão-de-obra, manutenção dos dispositivos, consumo de cavaco de eucalipto e custo de energia elétrica para acionamento do tridecanter.

Na TABELA 12, estão apresentados os CAPEX, OPEX e receitas/economias para cada cenário analisado.

TABELA 12 – SÍNTESE DOS CUSTOS DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DOS CENÁRIOS

Cenários	Cenário Base	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Custo de Investimento (R\$)	-	16.298.000,00	20.663.478,23	400.000,00
Biodigestor completo	-	15.576.000,00	15.576.000,00	-
Grupo motogerador	-	-	3.507.478,23	-
Melhorias na caldeira (queimador e adaptações na fornalha)	-	722.000,00	-	-
Trocador de calor (gases de exaustão)	-	-	480.000,00	-
Trocador de calor (aquecimento de água)	-	-	1.100.000,00	-
Sistema de alimentação e dosagem do combustível misto	-	-	-	400.000,00
Custos operacionais (R\$.ano⁻¹)	14.967.480,00	10.548.908,16	12.610.943,52	9.652.952,88
Consumo de cavaco	11.570.169,60	9.171.360,00	10.874.952,00	7.558.848,00
Energia elétrica consumida pelo Tridecanter	119.750,40	-	-	119.750,40
Transporte + destinação do LF	3.277.560,00	-	-	1.713.550,08
Biodigestor manutenção	-	1.116.743,76	1.116.743,76	-
Manutenção da caldeira	-	206.804,40	-	206.804,40
Manutenção motogerador	-	-	565.247,76	-
Mão de obra (1 funcionário)	-	54.000,00	54.000,00	54.000,00
Receita ou economia (R\$.ano⁻¹)	4.752.000,00	1.755.864,00	7.300.006,56	4.752.000,00
Cozimento do LF	-	1.755.864,00	1.755.864,00	-
Energia Gerada	-	-	3.391.486,56	-
Venda de óleo	4.752.000,00	-	-	4.752.000,00
Geração de água quente	-	-	2.152.656,00	-

FONTE: A autora (2025).

Os custos do biodigestor, motogerador, melhorias na caldeira e manutenções foram definidos pelo fabricante de acordo com cada cenário. Já os custos dos trocadores de calor e o sistema de alimentação e dosagem do combustível misto foram estimados. Também foi estimado o custo com mão de obra de um funcionário o qual se faz necessário em função da preservação do sistema, acionamento do motogerador diariamente e uma remoção de lodo do biodigestor. Os demais valores apresentados na TABELA 12 são resultados dos cálculos apresentados nas sessões anteriores.

O fluxo de caixa do projeto foi estimado considerando-se as receitas, os custos, um horizonte de 15 anos correspondente à vida útil do conjunto biodigestor e motogerador. A taxa nominal de desconto adotada foi de 20 % ao ano, valor definido

com base na taxa SELIC de 15 %, acrescida de um prêmio de risco de 5 %. Já a taxa de inflação considerada foi de 5,96 % ao ano. Com a aplicação da equação de Fisher, obteve-se uma taxa de desconto real de 13,25 % ao ano,

Com a aplicação da equação de Fisher, obteve-se uma taxa de desconto real de 13,25 % ao ano, valor utilizado nos cálculos de VPL, TIR e Payback Descontado para a avaliação da viabilidade econômica dos cenários simulados, apresentados na TABELA 13.

TABELA 13 – INDICADORES ECONÔMICOS DOS CENÁRIOS AVALIADOS

Cenário	Valor Presente Líquido (R\$)	Taxa Interna de Retorno (%)	Payback Descontado (anos)	Conclusão
Cenário 1	- 14.589.131,46	-25,70	Não houve	Inviável
Cenário 2	4.459.903,68	18,54	8,66	Viável
Cenário 3	37.162.828,82	N/A	0,0	Viável

FONTE: A autora (2025).

A análise dos indicadores econômicos apresentados na TABELA 13 permite observar diferenças significativas entre os três cenários simulados. O Cenário 1 demonstrou-se inviável do ponto de vista econômico, visto que o VPL se apresentou negativo, em aproximadamente - R\$ 14,6 milhões, TIR ficou em - 25,70 %, abaixo da taxa mínima de atratividade adotada de 13,25 % ao ano e não houve retorno do investimento dentro do horizonte de 15 anos analisado.

Essa situação decorre, principalmente, do elevado montante necessário para a implantação do biodigestor, que supera a economia obtida com a redução do consumo de cavaco. Ademais, a aplicação de uma taxa nominal de desconto de 20 % ao ano, associada à taxa de inflação de 5,96 % ao ano, não favoreceu o contexto econômico do investimento, tornando-o menos atrativo.

Tais resultados evidenciam que o investimento não é capaz de recuperar o capital aplicado durante o período analisado. Para aprimorar a viabilidade do projeto, torna-se imprescindível promover a redução dos custos de investimento (CAPEX) e operação (OPEX), ampliar os benefícios econômicos advindos do aproveitamento do lodo flotado, explorar alternativas como a comercialização de subprodutos ou buscar incentivos e subsídios que possam melhorar o fluxo de caixa da iniciativa.

Por outro lado, o Cenário 2 apresentou desempenho financeiro expressivamente melhor, com VPL positivo de cerca de R\$ 4,5 milhões, TIR de 18,54

%, sendo um valor superior à taxa de desconto e payback descontado de em 8,66 anos. Esses resultados evidenciam não apenas viabilidade econômica, mas também uma atratividade considerável frente ao risco do investimento.

Já o Cenário 3 destacou-se como a alternativa mais vantajosa, alcançando o maior VPL aproximadamente R\$ 37,1 milhões em 15 anos e um payback praticamente imediato, refletindo elevada capacidade de geração de caixa em curtíssimo prazo. Essa análise foi conduzida em comparação direta com o Cenário Base, contemplando no fluxo de caixa os custos de energia elétrica associados ao processo de centrifugação do lodo, bem como as despesas com destinação do lodo flotado, manutenção e mão de obra. Foi considerado também a receita proveniente da venda do óleo gerado após a centrifugação.

O Cenário 3 evidencia uma significativa vantagem econômica em relação ao Cenário Base. Os fluxos de caixa positivos, que se iniciam já no ano 0, refletem a redução do consumo de cavaco, os ganhos obtidos com a venda de óleo e a diminuição dos custos associados ao transporte e à destinação do lodo flotado. Esses fatores combinados resultam em uma economia considerável, reforçando a atratividade financeira do projeto.

Outro ponto relevante é que o investimento necessário para implementar o cenário é relativamente baixo, especialmente se comparado ao impacto econômico gerado. Isso indica um alto retorno sobre o capital investido, mesmo sem a necessidade de grandes desembolsos iniciais, característica que torna o projeto altamente eficiente do ponto de vista financeiro.

Em termos metodológicos, a análise de TIR não é aplicável no Cenário 3, dado que todos os fluxos de caixa são positivos desde o primeiro ano analisado.

Em suma, este cenário demonstra que inovações operacionais e aproveitamento de subprodutos podem gerar resultados financeiros expressivos com investimentos reduzidos, reforçando a importância da análise integrada entre eficiência operacional e estratégia econômica.

Ferreira (2016), analisou o uso do lodo flotado centrifugado de estação de tratamento de efluentes de frigorífico de aves como combustível em caldeiras para geração de vapor. O seu estudo mostrou que a centrifugação do lodo é essencial para reduzir a umidade e permitir a combustão adequada, permitindo uma economia de 10% no consumo de cavaco. Já do ponto de vista econômico, o projeto apresentou

indicadores favoráveis, com payback simples de 2,28 anos, VPL positivo e TIR elevada, evidenciando viabilidade econômica e baixo risco do investimento.

No trabalho de Machado (2021), a análise econômica e de viabilidade considerou a utilização do lodo flotado como combustível complementar à biomassa em caldeiras industriais, visando à geração de energia térmica. A pesquisa identificou que o lodo possui características físico-químicas adequadas para combustão, com poder calorífico elevado e teor de sólidos compatível com a queima eficiente, o que permite a substituição parcial do cavaco. Para quantificar a viabilidade do projeto que teve como investimento aproximadamente R\$ 900.000,00, foram calculados o VPL, TIR de 27 % ao ano e Payback em 34 meses, os quais demonstraram que, apesar do investimento inicial necessário para adaptações nas caldeiras e para o processamento do lodo, o retorno financeiro é positivo em médio prazo.

Diante disso, enquanto o Cenário 1 deve ser descartado por inviabilidade, os Cenários 2 e 3 demonstram atratividade, sendo o terceiro o mais promissor sob a perspectiva financeira.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise comparativa entre diferentes rotas tecnológicas para a produção de vapor, água quente e eletricidade, por meio da valorização energética do lodo flotado, avaliando alternativas tecnológicas para a geração de energia.

Inicialmente, foi apresentado o Cenário Base, sendo esse o cenário atual da indústria e que serviu de comparação para os demais cenários de estudo. No Cenário Base evidenciou-se a elevada dependência da planta industrial em relação ao cavaco de eucalipto como principal fonte de energia térmica. Os resultados demonstraram um consumo anual significativo de cavaco, refletindo diretamente nos custos operacionais da indústria. Além disso, os gastos relacionados à destinação do lodo centrifugado representaram um passivo econômico e ambiental relevante.

A partir dessa análise, foram propostos três cenários alternativos, cada um com uma abordagem específica para a utilização do lodo flotado e a redução do consumo de cavaco. O Cenário 1, que considerou a queima de biogás em caldeira, apresentou uma economia de cavaco de 20,7 %, mas revelou-se economicamente inviável devido ao alto investimento necessário para a implementação do biodigestor. O Cenário 2, que utilizou o biogás em um motor de combustão interna para cogeração de energia elétrica e térmica, mostrou-se financeiramente atrativo, com um VPL positivo e um payback descontado de 8,66 anos. Por fim, o Cenário 3, que adotou a co-combustão de lodo flotado centrifugado e cavaco de eucalipto, destacou-se como a alternativa mais vantajosa, apresentando o maior VPL e um payback praticamente imediato.

Os resultados obtidos evidenciam que a valorização energética do lodo flotado, seja por meio da produção de biogás ou da co-combustão, contribui significativamente para a redução dos custos operacionais e para a melhoria da viabilidade econômica do processo industrial. Além disso, a utilização do lodo como fonte de energia promove benefícios ambientais, ao reduzir a quantidade de resíduos destinados ao tratamento convencional.

Em suma, este trabalho de dissertação de mestrado apresentou soluções inovadoras e viáveis para a otimização do processo industrial, com potencial para serem aplicadas em outras plantas industriais que enfrentam desafios semelhantes. As análises técnicas e econômicas realizadas fornecem uma base sólida para a

tomada de decisão, contribuindo para a sustentabilidade e a eficiência dos processos produtivos. A continuidade das pesquisas nesta área é essencial para o desenvolvimento de tecnologias cada vez mais eficientes e sustentáveis, alinhadas às demandas ambientais e econômicas da sociedade.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, S. C. S. **Análise energética e financeira de um sistema de trigeração de energia.** Dissertação (Mestrado) — Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2019.

ALMEIDA, T. E. G. **Energia termossolar como alternativa na geração de vapor e água quente no setor agroindustrial.** Dissertação (Mestrado)—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

ALVES, H. J.; JUNIOR, C. B.; NIKLEVICZ, R. R.; FRIGO, E. P.; FRIGO, M. S.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, n. 13, p. 5215–5225, 2013.

AMARAL, A. C.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A.. O processo de biodigestão. In: KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** 2. ed. Concórdia: Sbera: Embrapa Suínos e Aves, 2022. p. 15–28.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **ASME PTC 4: Fired Steam Generators**, 2009.

ANTUNES, M. L. **Análise de possíveis cenários para utilização de biogás em um frigorífico.** Dissertação (Mestrado)—Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA PISCICULTURA (PEIXE BR). **Anuário 2024 Peixe Br Da Piscicultura.** [S.I.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.peixebr.com.br/anuario-2024/>>. Acesso em: 6 maio. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13541: Caldeiras a vapor — Inspeção de segurança.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEINA ANIMAL. **Relatório anual 2024.** [S.I.: S.n.]. Disponível em: <https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2024/04/ABPA-Relatorio-Anual-2024_capa_frango.pdf>. Acesso em: 5 maio. 2024.

ATELGE, M. R. KRISA, D. KUMAR, G.; ESKICIÖGLU, C.; NGUYEN, D. D.; CHANG, S. W.; ATABANI, A. E.; AL-MUHTASEB, A. H.; UNALAN, S. Biogas Production from Organic Waste: Recent Progress and Perspectives. **Waste and Biomass Valorization**, v. 11, n. 3, 2020.

AUSSANT, C. D.; FUNG, A. S.; UGURSAL, V. S.; TAHERIAN, H. Residential application of internal combustion engine based cogeneration in cold climate-Canada. **Energy and Buildings**, v. 41, n. 12, p. 1288–1298, dez. 2009.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Histórico das taxas de juros – Copom.** 2025a; Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 25 ago. 2025.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Histórico das metas para inflação – Copom.** 2025b. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicometas>. Acesso em: 25 ago. 2025.

BAZZO, E. **Geração de vapor.** 2.ed. rev. ampl. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995.

BLEY, C. Biogás: a energia invisível. **Centro Internacional de Energias Renováveis - CIBiogás-ER,** 2015.

BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Departamento de Inspeção de Produtos de Origem Animal – DIPOA.** [S.l.: S.n.].

CARVALHO, J. P. **Perspectivas da produção do biogás a partir da codigestão de lodo de esgoto e resíduos alimentares: revisão sistemática.** Dissertação (Mestrado)—Rio de Janeiro: Universidade Estadual do Rio de Janeiro, 2021.

CHEN, B.; YE, X.; SHEN, J.; WANG, S.; DENG, S.; YANG, J. Investigations on the energy efficiency limits for industrial boiler operation and technical requirements—taking China's Hunan province as an example. **Energy**, v. 220, 1 abr. 2021.

CREMONEZ, P. A.; TELEKEN, J. G.; MEIER, T. R. W. Two-Stage anaerobic digestion in agroindustrial waste treatment: A review. **Journal of Environmental Management**, v. 281, 1 mar. 2021.

DAMACENO, F. M. **Codigestão anaeróbia do lodo obtido em abatedouros de frangos e batata-doce: valorização energética e agronômica.** Dissertação (Mestrado)—Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fev. 2018.

DAMACENO, F. M. CHIARELOTTO, M.; RESTREPO, J. C. P. S.; BULIGON, E. L.; COSTA, L. A. M.; JUNIOR, J. L.; COSTA, M. S. S. M. Anaerobic co-digestion of sludge cake from poultry slaughtering wastewater treatment and sweet potato: **Energy and nutrient recovery. Renewable Energy**, v. 133, p. 489–499, 1 abr. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional – BEN 2025: ano base 2024.** Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf. Acesso em: 28 set. 2025.

FAGNANI, K. C.; ALVES, H. J.; CASTRO, L. E. N.; KUNH, S. S.; COLPINI, L. M. S. An alternative for the energetic exploitation of sludge generated in the physico-chemical effluent treatment from poultry slaughter and processing in Brazilian industries. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 2, 1 abr. 2019.

FAGNANI, K. C. **Valorização energética de lodos de sistema de tratamento de efluentes da indústria de abate e processamento de carnes via codigestão anaeróbia.** Tese (Doutorado)—Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2023.

FERREIRA, A. **Valorização energética do lodo flotado de estação de tratamento de efluentes de frigorífico de aves para geração de vapor.** 2016. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

FLORIANI, S. L.; VIRMOND, E.; LUIZ, D. B.; ALTHOFF, C. A.; JOSÉ, H. J.; MOREIRA, R. F. P. M.. Potential of Industrial Solid Wastes as Energy Sources and Gaseous Emissions Evaluation in a Pilot Scale Burner (ES2008-54355). **Journal Of Energy Resources Technology**, [S.L.], v. 132, n. 1, p. 1-7, 1 mar. 2010.

GABBRIELLI, R.; CASTRATARO, P.; MEDICO, F. del; PALO, M. di; LENZO, B., Levelized Cost of Heat for Linear Fresnel Concentrated Solar Systems. **Energy Procedia**, [S.I.], v. 49, p. 1340-1349, 2014.

GHOFRANI-ISFAHANI, P.; BANIAMERIAN, H.; TSAPEKOS, P.; ALVARADO-MORALES, M.; KASAMA, T.; SHAHROKHI, M.; VOSSOUGHI, M.; ANGELIDAKI,I. Effect of metal oxide based TiO₂ nanoparticles on anaerobic digestion process of lignocellulosic substrate. **Energy**, v. 191, 21 nov. 2020.

GUERI, M. V. D.; SOUZA, S. N. M. de; KUCZMAN, O. Parâmetros operacionais do processo de digestão anaeróbia de resíduos alimentares: uma revisão. **BIOFIX Scientific Journal**25, v. 3, n. 1, p. 17–25, 2018.

IRENA. **Renewable power generation costs in 2024.** 2025. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_TEC_RPGC_in_2024_2025.pdf. Acesso em: 21 set. 2025.

KUNH, S. S. **Viabilidade técnica e econômica da produção de briquetes de lodo do tratamento primário de efluente avícola e serragem.** Tese (Doutorado)—Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2022.

LOYOLA, L. R.; SILVA, L. A. S.; VASCONCELLOS, A. P.; SANTOS, J. J. C. S. A Eficiência do Sistema de Aproveitamento Energético de Resíduos Municipais na Empresa Marca Ambiental: Repotenciação e Cogeração. **XV Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica**, nov. 2022.

MACHADO, A. J. M. **Análise de viabilidade econômica para reaproveitamento de lodo de estação de tratamento de efluentes de indústria alimentícia.** 2021. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/31319/4/An%C3%A1liseDeViabilidade.pdf>. Acesso em: 16 set. 2025.

MANTOVAN, F. M. **Estudo da queima de lodo flotado de estação de tratamento de efluentes em caldeira a biomassa.** Dissertação (Mestrado)—Palotina: Universidade Federal do Paraná, 2022.

MOJICA-CABEZA, C. D. GARCÍA-SÁNCHEZ, C. E.; SILVA-RODRÍGUEZ, R.; GARCÍA-SÁNCHEZ, L. A review of the different boiler efficiency calculation and modeling methodologies. **Informador Técnico**, v. 86, n. 1, 21 out. 2021.

NOVAK, A. C. SCHNEIDER, A. H.; SIMÃO, C. A. F.; FRÖHLICH, C. E.; SYDNEY, E. B.; BOSCH, E.; LOFHAGEN, J. C. P.; BAZZO, J.; WILDAUER, L. D. B. S.; MAKISHI, L. M. M.; SOUZA, M.; STUMM, M. **Oportunidades da Cadeia Produtiva de Biogás para o Estado do Paraná**. Curitiba: Senai/PR, 2016.

RESTREPO, J. C. P. S. **Codigestão anaeróbia de lodo de flotador do abate de frangos e caldo de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado)—Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, fev. 2019.

SCHULTZ, E. L.; SOARES, I. P.. **Reforma do biogás – revisão**. [S.I.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/documents/1355242/0/Biog%C3%A1sFert+-Reforma+do+biog%C3%A1s+-+Revis%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 9 jun. 2023.

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

SENA, R. F. de; CLAUDINO, A.; MORETTI, K.; BONFANTI, I. C.P.; MOREIRA, R. F.P.M.; JOSÉ, H. J.. Biofuel application of biomass obtained from a meat industry wastewater plant through the flotation process—A case study. **Resources, Conservation and Recycling**, [S.L.], v. 52, n. 3, p. 557-569, jan. 2008.

SILVA, M. I.; BORTOLI, A. L. Modelagem e simulação do processo de formação do biogás. In: São José dos Campos - SP: **XXXVII CNMAC**, 2018.

SILVA, S. C.; RODRIGUES, C.; BLEYER, G. C.; DA CRUZ, R.; BIANCHI, F. M.; VIRMOND, E.; WATZKO, E. S. Transforming sludge into energy: impact of blend percentage on energy recovery potential and environmental benefits of co-combustion of wastewater sludge and coal in Brazil. **Waste Management**, v. 194, p. 177-185, 2025.

VIRMOND E.; FLORIANI S.L.; JOSÉ H.J.; MOREIRA R. F. P. M. Co-combustion of wood chips with the biomass obtained from the physico-chemical treatment of slaughterhouse wastewater for steam generation e a case study. In: **The Twenty-Third International Conference On Solid Waste Technology And Management**, 23, 2008, Philadelphia, [S.N.], p. 1177 – 1188, 2008.

VIRMOND, E.; SCHACKER, R. L.; ALBRECHT, W.; ALTHOFF, C. A.; SOUZA, M. de; MOREIRA, R. F.P.M.; JOSÉ, H. J.. Organic solid waste originating from the meat processing industry as an alternative energy source. **Energy**, [S.L.], v. 36, n. 6, p. 3897- 3906, jun. 2011.

XAVIER, B. H. **Aspectos termodinâmicos, ecológicos e econômicos de sistemas de cogeração com motores de combustão interna operando com gás natural**,

biogás e gás de síntese. Dissertação (Mestrado)—Guaratinguetá: Universidade Estadual Paulista, 2016.

XIMENES, R. D. Aproveitamento do biogás como fonte energética: uma revisão sobre as principais barreiras à difusão do sistema tecnológico de inovação do biogás no Brasil. Dissertação (Doutorado)—Sorocaba: Universidade Federal de São Carlos, 2024.

ANEXO 1 – DADOS REFERENTE AO TRIDECANTER UTILIZADO NA ANÁLISE

Technical Parameter										
Model	Diameter	Length	Max Speed (R/Min)	L/D Ratio	G-Force (G)	Capacity	Main Motor Power	Weight	Dimension (L*W*H)	
	(Mm)	(Mm)				(M3/H)	(Kw)	(Kg)	(Mm)	
LWS355*1160	355	1160	3600	3.3	2576	2-8	15	1400	2470*1350*830	
LWS355*1460	355	1460	3600	4	2576	2-10	15	1800	2750*1350*830	
LWS450*1800	450	1800	2800	4	1976	4-25	37	2500	3320*1700*1130	
LWS500*2000	500	2000	2500	4	1750	5-35	45	4000	3520*1800*1170	
LWS520*2080	520	2080	3200	4	3154	3-35	55	5000	4510*1410*1170	
LWS550*2000	550	2000	2800	4	2414	6-40	55	5700	4570*1380*1600	
LWS650*1950	650	1950	2200	3	1761	6-45	75	5000	4840*1510*1720	
LWS650*2600	650	2600	2000	4	1456	6-65	90	6000	5490-1510*1720	

Link de acesso: <https://www.senz-separation.com/3-phase-decanter-centrifuge/tricanter-centrifuge.html>

ANEXO 2 – DADOS DO MCI

Motor de combustão interna (MCI) modelo SGE-56HM, fabricado pela Guasscor.

G-56HM

Engine Parameters ^{a)}	English Units	Metric Units				
Speed	rpm		1,200		1,500	1,800
Engine power	bhp	kWb	1,395	(1,040)	1,840	(1,373)
Cylinder arrangement			V16			
Mean effective pressure	psi	bar	268	(18.5)	284	(19.6)
Bore	inch	mm	6.30	(160)	6.30	(160)
Stroke	inch	mm	6.89	(175)	6.89	(175)
Displacement	cuin	Litres	3,436	(56.3)	3,436	(56.3)
Mean piston speed	in/s	m/s	276	(7.0)	344	(8.8)
Compression ratio			119 : 1			
Combustion air massflow	lbs/hr	kg/h	10,406	(4,720)	13,360	(6060)
Packaged ventilation air flow ^{b)}	scfm	m ³ /h	42,649	(72,800)	55,621	(94,500)
Engine coolant capacity (Main circuit) ^{a)}	gal.	Litres	69	(260)	69	(260)
Engine coolant capacity (Aux. circuit) ^{a)}	gal.	Litres	20	(75)	20	(75)
Lube oil capacity ^{c)}	gal.	Litres	111	(419)	111	(419)
Lube oil consumption ^{c)}	lbs/bhp.hr	g/kWh	0,00025	(0.15)	0,00025	(0.15)

G-56HM

86

Energy Balance	English Units	Metric Units		G-56HM
Generator efficiency ^{a)7)}	%	%	96.8	97.3
Electrical power ^{a)7)}	kWe	kW	1,007	1,337
Jacket (HT) water heat	BTu x 1,000/hr	kW	2,000.9	(586)
Intercooler (LT) water heat	BTu x 1,000/hr	kW	204.9	(60)
Exhaust heat - cooled to 120°C	BTu x 1,000/hr	kW	1,659.4	(486)
Engine radiation heat	BTu x 1,000/hr	kW	225.4	(66)
Generator radiation heat	BTu x 1,000/hr	kW	99.4	(29)
Fuel consumption ⁸⁾	BTu x 1,000/hr	kW	8,174.1	(2,394)
Mechanical efficiency	%		43.4	44.4
Electrical efficiency	%		42.2	43.2
Thermal efficiency	%		47.3	46.1
Total efficiency	%		89.5	89.3
			89.7	

System Parameters	English Units	Metric Units	G-56HM	
Jacket (HT) water temperature max.	°F	°C	194 (90)	194 (90)
Jacket (HT) water flow rate min.	gpm	m³/h	181 (70)	220 (50)
Jacket (HT) water flow rate max.	gpm	m³/h	308 (70)	308 (70)
Intercooler stages			Double	
Intercooler (LT) coolant temperature	°F	°C	131 (55)	131 (55)
Intercooler (LT) coolantflow rate min.	gpm	m³/h	66 (15)	88 (20)
Intercooler (LT) coolantflow rate max.	gpm	m³/h	132 (30)	132 (30)
Exhaust manifold type			Dry	
Exhaust temperature	°F	°C	763 (406)	766 (408)
Exhaust mass flow wet	lbs/hr	kg/h	11,222 (5,090)	13,250 (6,010)
Exhaust back pressure max.	psi	mbar	0.65 (45)	0.65 (45)
Maximum pressure loss in front of air cleaner	psi	mbar	0.073 (5)	0.073 (5)
Fuel pressure range	psi	mbar	0.73 - 3.48 (50 - 240)	0.73 - 3.48 (50 - 240)
Starter battery 2x12 V, capacity required	Ampere-hour		280	
Emissions "	English Units	Metric Units	G-56HM	
NOx	g/bhp.hr		< 1.1	< 1
C.O	g/bhp.hr		< 2.2	< 2.2
THC (in C1base)	g/bhp.hr		< 4.3	< 4.3
NMHC (in C1base)	g/bhp.hr		< 0.7	< 0.7