

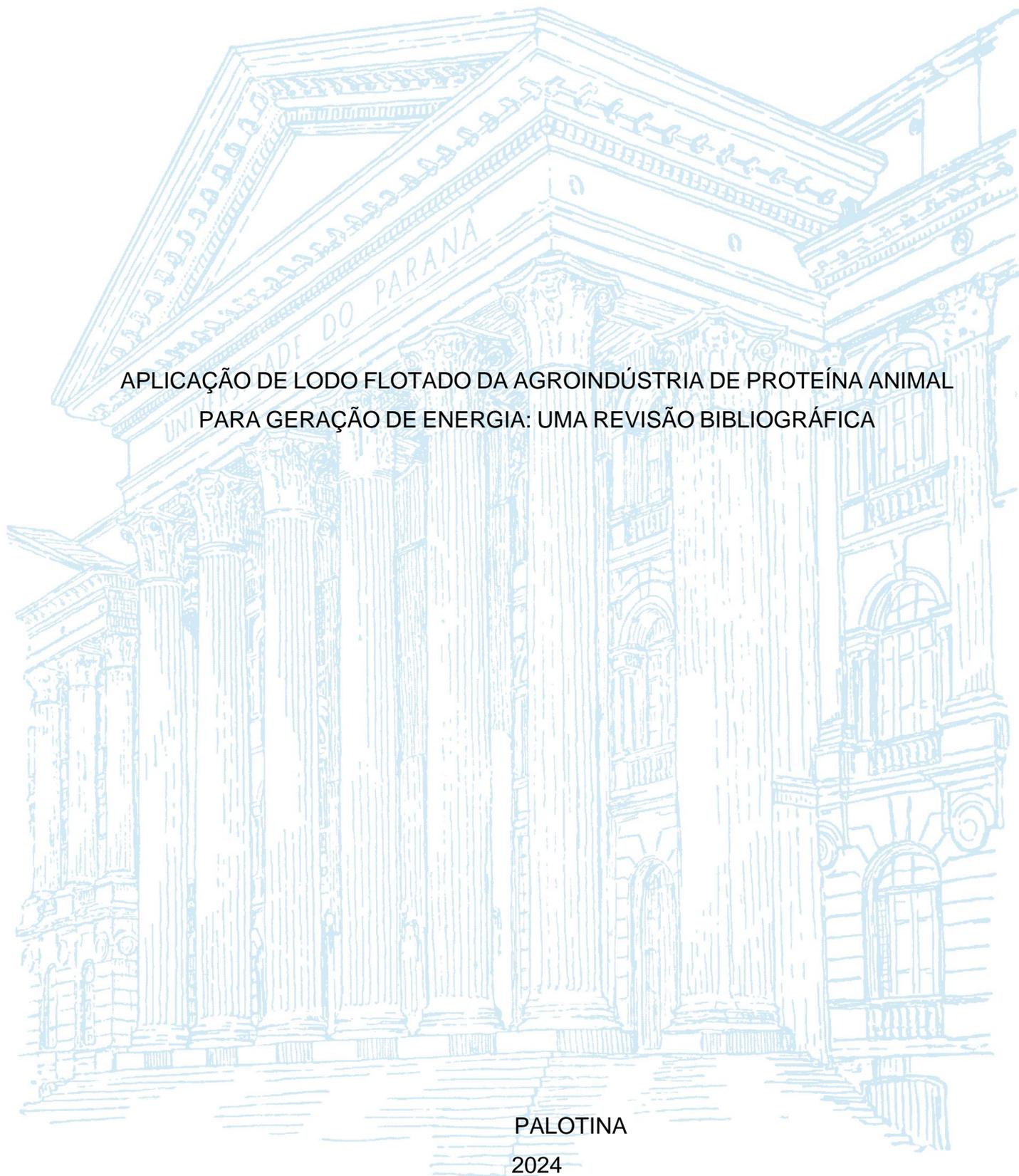
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NATÁLIA IZABEL NEUMANN JORGE

APLICAÇÃO DE LODO FLOTADO DA AGROINDÚSTRIA DE PROTEÍNA ANIMAL  
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

PALOTINA

2024



NATÁLIA IZABEL NEUMANN JORGE

APLICAÇÃO DE LODO FLOTADO DA AGROINDÚSTRIA DE PROTEÍNA ANIMAL  
PARA GERAÇÃO DE ENERGIA: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

Orientador: Profa. Dra. Adriana Ferla de Oliveira

PALOTINA

2024





UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

## ATA DE REUNIÃO

Aos quatro dias do mês de dezembro do ano de 2024, das 14h00min às 15h30min, na plataforma virtual *Microsoft Teams* [link](#), compareceram para defesa pública do Trabalho de Conclusão de Curso, requisito obrigatório para a obtenção do título de Engenheira de Energia a aluna Natália Izabel Neumann Jorge, tendo como Título do Trabalho de Conclusão de Curso "Aplicação de lodo flotado da agroindústria de proteína animal para geração de energia: uma revisão bibliográfica". Constituíram a Banca Examinadora os professores: Prof<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Adriana Ferla de Oliveira (Orientadora e Presidente da Banca), Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin e a Prof<sup>a</sup>. Ma. Debora Hungaro Micheletti. O orientador e Presidente da Banca concedeu a palavra ao discente, para exposição do seu trabalho. A seguir, foi concedida a palavra em ordem sucessiva aos membros da Banca de Exame, os quais passaram a arguir o discente. Ultimada a defesa, que se desenvolveu nos termos normativos, a Banca de Exame, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo atribuído ao discente as seguintes notas: **Prof<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup> Adriana Ferla de Oliveira, nota: 90 (noventa), Prof. Dr. Eduardo Lucas Konrad Burin, nota: 90 (noventa), e Prof<sup>a</sup>. Ma. Debora Hungaro Micheletti, nota: 90 (noventa)**. A nota final da discente, após a média aritmética dos três membros da banca de exame, foi **90 (noventa)** considerando a discente **APROVADA**. As considerações e sugestões feitas pela Banca de Exame deverão ser atendidas pela discente sob acompanhamento de seu orientador. Nada mais havendo a tratar foi lavrada a presente ata, que, lida e aprovada, vai por todos assinada eletronicamente.



Documento assinado eletronicamente por **ADRIANA FERLA DE OLIVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/12/2024, às 15:17, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **EDUARDO LUCAS KONRAD BURIN, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 04/12/2024, às 15:17, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Débora Hungaro Micheletti, Usuário Externo**, em 04/12/2024, às 15:17, conforme art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida [aqui](#) informando o código verificador **7026189** e o código CRC **E3C1694A**.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, meu refúgio e fortaleza nos momentos difíceis, que sempre me sustentou e guiou ao longo desta jornada.

À minha família, expresso minha mais profunda gratidão: ao meu pai, José, à minha mãe, Marly, à minha irmã, Ágata, e à minha avó Mafalda (em memória), que compartilharam comigo cada conquista e cada desafio, sendo meu alicerce e fonte de inspiração para alcançar meus objetivos.

Ao meu companheiro, Marcos, agradeço por estar ao meu lado, oferecendo apoio incondicional e acreditando em mim mesmo nos momentos mais difíceis.

Aos amigos, que tornaram esta jornada mais leve e especial, agradeço por me lembrarem da força e do valor da amizade verdadeira.

Aos professores, minha admiração e reconhecimento por terem me transmitido não apenas conhecimento técnico, mas também valores como caráter e dedicação. Um agradecimento especial à minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Adriana Ferla de Oliveira, e ao meu coorientador, Dr. Rodolfo de Andrade Schaffner, pela generosidade e comprometimento em me orientar, sempre dispostos a contribuir com seu tempo e sabedoria.

Por fim, agradeço à Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina, por me oferecer uma formação rica e diversificada, e a todos os colaboradores do setor, que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste sonho.

## RESUMO

O presente estudo aborda a utilização do lodo flotado, subproduto gerado no tratamento de efluentes da agroindústria de proteína animal, como alternativa energética. No Brasil, essa indústria desempenha um papel crucial no mercado global de alimentos, mas enfrenta desafios na gestão de resíduos. A compostagem, opção amplamente empregada, apresenta altos custos e limitações logísticas. Diante disso, explorar o potencial energético do lodo flotado torna-se uma solução promissora, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e a eficiência econômica. Este trabalho teve como objetivo principal revisar tecnologias de conversão energética do lodo flotado, identificando desafios e oportunidades no seu uso. Com características como elevado poder calorífico e ampla disponibilidade, o lodo flotado pode ser utilizado como combustível em caldeiras industriais, reduzindo o consumo de combustíveis fósseis e o volume de resíduos descartados. Além disso, tecnologias como pirólise, gaseificação e biodigestão anaeróbia ampliam suas possibilidades de reaproveitamento. A partir dos métodos de conversão energética é possível obter vetores energéticos de grande valor agregado como *syngas*, biochar, biogás, biodiesel e H<sub>2</sub> gasoso. Essas abordagens se alinham aos princípios da economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, promovendo práticas industriais mais responsáveis e competitivas. Por fim, foi observado que, para que seu potencial seja plenamente explorado, é fundamental a realização de estudos experimentais mais detalhados e a implementação de políticas públicas que incentivem o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para o setor.

Palavras-chave: lodo flotado, gestão de resíduos, sustentabilidade.

## ABSTRACT

This study addresses the use of floated sludge, a by-product generated during the treatment of effluents from the animal protein agribusiness, as an energy alternative. In Brazil, this industry plays a crucial role in the global food market but faces challenges in waste management. Composting, a widely employed option, entails high costs and logistical limitations. In this context, exploring the energy potential of floated sludge emerges as a promising solution, contributing to environmental sustainability and economic efficiency. The primary objective of this work was to review energy conversion technologies for floated sludge, identifying challenges and opportunities for its use. With characteristics such as high calorific value and wide availability, floated sludge can be used as fuel in industrial boilers, reducing fossil fuel consumption and the volume of waste disposed of. Furthermore, technologies like pyrolysis, gasification, and anaerobic digestion expand its reuse possibilities. Through energy conversion methods, it is possible to obtain high-value-added energy carriers such as *syngas*, biochar, biogas, biodiesel, and H<sub>2</sub>. These approaches align with the principles of the circular economy and the Sustainable Development Goals, promoting more responsible and competitive industrial practices. Finally, it was observed that for its potential to be fully realized, more detailed experimental studies are essential, as well as the implementation of public policies that encourage the development of innovative technologies for the sector.

Keywords: floated sludge, waste management, sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – LINHA VERDE E LINHA VERMELHA DE EFLUENTES DE ABATEDOURO .....	16
FIGURA 2 – FLUXOGRAMA DO TRATAMENTO PRIMÁRIO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA FRIGORÍFICA.....	18
FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM FLOTADOR INDUSTRIAL.....	23
FIGURA 4 – FLOTADOR INDUSTRIAL .....	23
FIGURA 5 – CENTRÍFUGA TRIDECANTER .....	24
FIGURA 6 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UMA BOMBA CALORIMÉTRICA.....	32
FIGURA 7 – ETAPAS DO PROCESSO DO LODO FLOTADO DESDE O EFLUENTE ATÉ A CALDEIRA.....	34
FIGURA 8 – DIGESTOR BATELADA .....	35
FIGURA 9 – CALDEIRA INDUSTRIAL.....	36
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR .....	38
FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA CALDEIRA AQUATUBULAR. ....	39
FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA CALDEIRA DE CONFIGURAÇÃO MISTA .....	39
FIGURA 13 – ALIMENTAÇÃO DE CALDEIRAS.....	40
FIGURA 14 – FLUXOGRAMA DA ROTA BIOQUÍMICA PARA O LODO FLOTADO	41
FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DA ROTA DE ULTRASSONICAÇÃO PARA O LODO FLOTADO .....	42
FIGURA 16 – FLUXOGRAMAS DA ROTA TERMOQUÍMICA PARA O LODO FLOTADO .....	42
FIGURA 17 – PRODUTOS DA REFORMA TERMOCATALÍTICA TCR® .....	44
FIGURA 18 – IMAGENS DO LODO ÚMIDO E SECO E FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO SYNGAS .....	51

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – PRINCIPAIS COAGULANTES PARA FLOTAÇÃO E SUAS RESPECTIVAS FAIXAS DE PH ÓTIMO.....	19
TABELA 2 – RESULTADO DAS ANÁLISES IMEDIATAS DOS TRABALHOS ANALISADOS .....	28
TABELA 3 – RESULTADOS DE ANÁLISE ELEMENTAR DAS AMOSTRAS DE LODO .....	30
TABELA 4 – VALORES DE PCS E PCI PARA COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS.....	33
TABELA 5 – PODER CALORÍFICO INFERIOR E PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO LODO FLOTADO.....	33

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABPD	- Associação Brasileira de Proteína Animal
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ASTM	- Sociedade Americana de Testagem e Materiais
bs	- Base seca
bu	- Base úmida
CF	- Carbono fixo
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	- Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
ESG	- Ambiental, Social e Governança
FAD	- Flotação por ar dissolvido
MDL	- Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MV	- Materiais voláteis
NOx	- Óxidos de nitrogênio
ODS	- Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PCI	- Poder Calorífico Inferior
PCS	- Poder Calorífico Superior
PNRS	- Política Nacional de Resíduos Sólidos
PoliDADMAC	- Nome comercial para polidialildimetilamônio
PROINFA	- Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SEMA	- Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SOx	- Óxidos de enxofre
TCD	- Detector de condutividade térmica
TCR	- Reforma termo-catalítica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 OBJETIVOS .....	13
1.1.1 Objetivo geral .....	13
1.1.2 Objetivos específicos .....	13
1.2 JUSTIFICATIVA .....	13
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
2.1 ORIGEM DO LODO FLOTADO DE AGROINDÚSTRIA DE PROTEÍNA ANIMAL .....	16
2.2 TRATAMENTO DO EFLUENTE DE AGROINDÚSTRIA DE PROTEÍNA ANIMAL .....	17
2.2.1 Processo de coagulação e floculação .....	19
2.2.2 Processo de flotação .....	21
2.3 IMPORTÂNCIA DO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS.....	24
2.4 COMPOSIÇÃO DO LODO FLOTADO ORIUNDO DE AGROINDÚSTRIA DE PROTEÍNA ANIMAL PARA FINS ENERGÉTICOS .....	25
2.4.1 Teor de umidade .....	26
2.4.2 Análise imediata .....	27
2.4.3 Análise elementar.....	29
2.4.4 Poder calorífico .....	30
2.5 TRATAMENTO DO LODO FLOTADO PARA UTILIZAÇÃO ENERGÉTICA POR QUEIMA .....	34
2.6 APLICAÇÕES DO LODO FLOTADO EM CALDEIRAS .....	36
2.7 COMPARAÇÃO DE TECNOLOGIAS: COMBUSTÃO VS. OUTRAS ALTERNATIVAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA.....	41
2.8 ASPECTOS ECONÔMICOS E REGULATÓRIOS .....	44
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>47</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>49</b>
4.1 SÍNTESE DOS PRINCIPAIS ESTUDOS.....	49
4.2 EFICIÊNCIA E IMPACTOS DO USO DO LODO COMO COMBUSTÍVEL .....	55
4.3 DESAFIOS E PERSPECTIVAS PARA MELHORIAS E SUSTENTABILIDADE ..	57
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>59</b>
5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	60

REFERÊNCIAS.....	61
------------------	----

## 1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade e a busca por fontes alternativas de energia têm se consolidado como pilares centrais para o desenvolvimento de setores industriais em escala global (Sharma *et al.*, 2024). No Brasil, a agroindústria de proteína animal ocupa um lugar de destaque no cenário econômico, representando uma das atividades mais expressivas no mercado global de alimentos (CNA, 2023). Contudo, essa escala produtiva acarreta desafios significativos, especialmente no que se refere à gestão de resíduos industriais. Entre esses resíduos, destaca-se o lodo flotado, subproduto gerado durante o tratamento de efluentes de abatedouros e unidades de processamento de proteína animal (Fagnani *et al.*, 2019).

O manejo inadequado do lodo flotado pode representar altos custos logísticos e impactos ambientais. Atualmente, a compostagem tem sido a principal forma de destinação desse material, atendendo às regulamentações ambientais. No entanto, esta prática exige investimentos elevados em transporte e processamento, representando uma limitação para empresas do setor (Mantovan, 2022). Diante desse cenário, surge a necessidade de explorar alternativas que aliem sustentabilidade ambiental e eficiência econômica. Uma dessas alternativas é a utilização do lodo flotado como combustível complementar em processos de geração de energia térmica e elétrica (Moktadir; Ren; Zhou, 2023).

O lodo flotado apresenta características químicas e físicas que o tornam atrativo para aplicações energéticas, como elevado poder calorífico e disponibilidade em larga escala nas indústrias brasileiras (Sena, 2005). Seu uso pode ser integrado à caldeiras industriais em combinação com combustíveis principais, contribuindo para a redução do consumo de fontes fósseis e do volume de resíduos descartados (Teixeira, 2023). Além disso, outras tecnologias como a pirólise, gaseificação e biodigestão anaeróbia, ampliam o potencial de valorização energética deste subproduto. Essas alternativas não apenas reduzem os impactos ambientais, como também promovem o alinhamento das indústrias aos princípios da economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (Moktadir; Ren; Zhou, 2023).

O reaproveitamento energético do lodo flotado também apresenta benefícios econômicos e estratégicos. Ao ser utilizado como combustível em caldeiras, o lodo pode reduzir os custos com energia e logística de descarte (Fagnani *et al.*, 2019).

Além disso, o aproveitamento deste resíduo permite que as empresas demonstrem um compromisso com práticas sustentáveis, o que contribui para a melhoria da imagem corporativa, atração de investidores e atendimento às exigências ambientais. A integração de soluções energéticas baseadas em resíduos é essencial para o fortalecimento da competitividade das empresas no mercado global, especialmente em um cenário onde sustentabilidade e governança corporativa são fatores determinantes para o sucesso empresarial.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Levantar o potencial do lodo flotado da agroindústria de proteína animal como fonte de energia, bem como apresentar as tecnologias de conversão estudadas e empregadas.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Levantar as tecnologias disponíveis para a conversão de lodo flotado em energia.
- b) Verificar o potencial energético do lodo flotado, com base em estudos de caso e dados experimentais.
- c) Identificar os principais desafios e oportunidades na utilização desse resíduo para a geração de energia.
- d) Apontar as lacunas existentes e necessidade de estudos mais apurados sobre a utilização e conversão energética do lodo flotado.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo a Associação Brasileira de Proteína Animal (ABPA), a produção de frango no Brasil cresceu mais de 1087% desde 1980, alcançando 14,833 milhões de toneladas em 2023. Desse total, 5,139 milhões de toneladas foram exportadas, consolidando o país como o segundo maior produtor mundial e o maior exportador de frango (ABPA, 2024). Além da produção de aves, o país também se destaca na

produção de carne bovina, e bateu o seu recorde de produção em 2023 com 8,91 milhões de toneladas (CEPEA, 2024).

A produção de frango, carne bovina e porco combinados terá crescimento estimado de 33 milhões de toneladas até o final da década (Brasil, 2022). A produção de suínos bateu recordes em 2023 e atingiu a marca de 5,29 milhões de toneladas, ocupando a terceira posição do ranking de maiores exportadores (Miele; Sandi, 2023). Já a produção de peixes cultivados no Brasil atingiu 887 mil toneladas em 2023 segundo a Associação Brasileira de Piscicultura (Peixe BR, 2023).

Abatedouros são segmentos industriais que necessitam de grande quantidade de água para o abate e limpeza dos equipamentos (Aziz *et al.*, 2019). A quantidade de água para o processo depende do tipo de animal abatido. Para bovinos, utiliza-se 540 L e 1630 L por animal nas linhas verde e vermelha, respectivamente. Para produção de suínos, utiliza-se de 1600 L a 9000 L por tonelada de animal. Já a indústria de aves consome de 4000 L a 30000 L de água por tonelada de animal nos processos de abate e processamento (BREF, 2021). Na indústria pesqueira, são usados cerca de 900 L por tonelada de peixe na fase de limpeza e 3800 L por tonelada de peixe na fase de evisceração (EMBRAPA, 2020).

O resultado do tratamento desta água utilizada no abatedouro e o processamento da proteína animal é o lodo flotado (Madeira *et al.*, 2023). Após sua separação, ele é aquecido e centrifugado. O resultado da centrifugação são três fases: o óleo, a água (ou efluente clarificado) e o lodo flotado centrifugado. O óleo é comercializado, a água é destinada para tratamento, e o lodo flotado é encaminhado para compostagem. Mas apesar de a compostagem ser uma destinação adequada e legal, ela é custosa devido à necessidade de transporte do resíduo (UCS, 2024). O custo mensal para a destinação a compostagem em uma agroindústria que abate 650 mil frangos/dia e 75 mil tilápias/dia ultrapassa R\$300.000,00 mensais (Teixeira, 2023).

Surge então a necessidade de uma alternativa para a destinação do lodo flotado. Uma alternativa viável é o uso do lodo como combustível auxiliar na combustão de caldeiras, em combinação com o combustível principal, para a geração de vapor voltado às necessidades da indústria (Fagnani, 2017).

O lodo flotado possui alto poder calorífico inferior e pode contribuir significativamente para geração de energia térmica ou elétrica. Suas aplicações estão ligadas ao seu comportamento na combustão e pirólise e suas características

físicas e químicas (Zheng; Koziński, 2000). Neste cenário, o estudo sobre o aproveitamento energético do lodo flotado é essencial, pois permite identificar as melhores tecnologias e práticas para otimizar esse processo. Assim, a pesquisa pode contribuir como fonte para pesquisas futuras, pois se caracteriza como uma revisão bibliográfica.



A junção das linhas verde e vermelha resulta no efluente de abatedouros. Esse efluente passa por um tratamento físico-químico resultando na formação do lodo flotado.

## 2.2 TRATAMENTO DO EFLUENTE DE AGROINDÚSTRIA DE PROTEÍNA ANIMAL

As águas residuais de abatedouros contêm elevados níveis de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), devido a presença de óleos, graxas, sólidos dissolvidos e em suspensão, pedaços de carne, vísceras e gorduras. Ademais, há também produtos utilizados na sanitização e desinfecção, usados na limpeza dos equipamentos e maquinários. Assim, em razão de sua composição, é fundamental aplicar múltiplos níveis de tratamento para que a água residual atenda aos padrões exigidos para descarte em corpos hídricos receptores (Chan *et al.*, 2009; Harris; McCabe, 2015)

Para definir qual tratamento deve ser aplicado, é necessário levar em consideração os custos de investimento e operação, clima, área para implantação do tratamento, a classe do corpo receptor, legislação, direção dos ventos, proximidade de residências, assistência técnica, controle operacional e estabilidade do terreno (Azzolini; Fabro, 2013; Scarassati *et al.*, 2003). Tendo considerado esses fatores, primeiramente são aplicados métodos físicos de tratamento, para remover sólidos maiores e líquidos imiscíveis em água. Subsequentemente, os processos físico-químicos ou biológicos são realizados, a fim de diminuir os contaminantes presentes (Bustillo-Lecompte; Mehrvar, 2017; Maldaner, 2008; Mendes; Castro, 2005; Pandey *et al.*, 2017).

Segundo Nunes (2012) e Sperling (2014), as estações de tratamento de efluentes são divididas em quatro níveis:

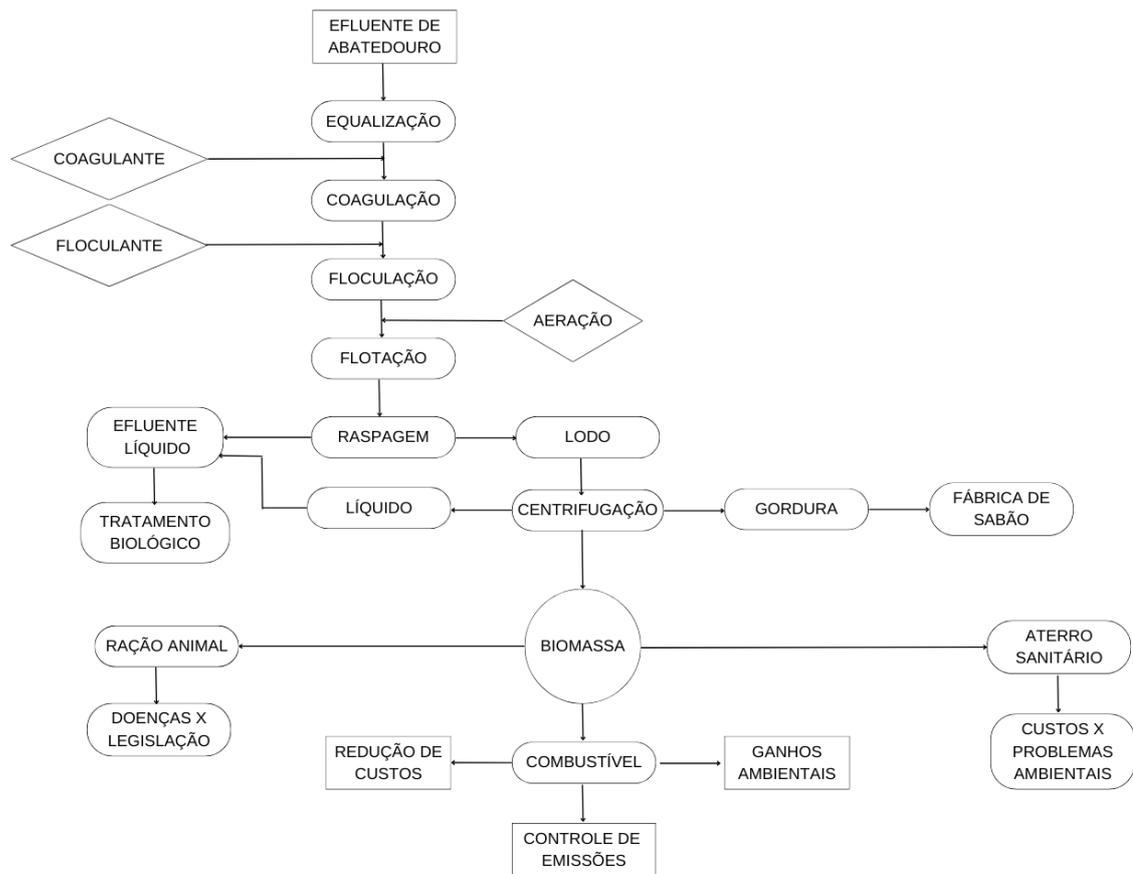
- a) Tratamento preliminar: consiste na retenção de materiais grosseiros, flutuantes e sedimentos minerais. Utilizam-se grades, desarenadores, caixas de retenção de óleo e gordura e peneiras;
- b) Tratamento primário: retirada de matéria orgânica em suspensão. Utiliza-se coagulação, floculação, decantação primária, flotação e neutralização;
- c) Tratamento secundário: separação da matéria orgânica dissolvida e em suspensão. São utilizados lagoas de estabilização, sistemas de lodo ativado,

processos anaeróbios com alta eficiência na eliminação de carbono orgânico e filtros biológicos

d) Tratamento terciário: seu objetivo é obter um efluente de alta qualidade. Pode ser utilizado adsorção com carvão ativado, osmose inversa, eletrodiálise, troca iônica, filtros de areia, remoção de nutrientes, oxidação química e remoção de organismos patogênicos.

Na FIGURA 2 é apresentado um fluxograma do tratamento primário que resulta na obtenção do lodo. O processo é realizado por meio da coagulação e floculação, seguida de flotação simples, que remove a maior quantidade possível de sólidos, adicionando coagulantes e coadjuvantes de coagulação, que promovem a adesão das partículas às bolhas que se elevam no tanque de flotação, fazendo com que o lodo flutue e possa ser removido por raspagem (Sena, 2005).

FIGURA 2 – FLUXOGRAMA DO TRATAMENTO PRIMÁRIO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA FRIGORÍFICA



FONTE: Adaptado de Sena (2005).

### 2.2.1 Processo de coagulação e floculação

A etapa química do processo é chamada de coagulação. Seu objetivo é a remoção de partículas coloidais com diâmetro entre 0,001  $\mu\text{m}$  e 1  $\mu\text{m}$  (Lora, 2001). Na etapa física, chamada de floculação, há a formação de flocos que variam de 100 a 5.000  $\mu\text{m}$  (Bassin; Dezotti, 2008).

A coagulação e floculação podem ser afetadas pela espécie e dosagem do coagulante; tempo e gradiente de velocidade de mistura rápida; auxiliares de coagulação; dispersão do agente na mistura rápida, teor e tipo de cor e turbidez (presente no efluente), características químicas (efluente), temperatura, agitação e o pH do meio (Botari; Botari; Greatti, 2017; Heller; Pádua, 2016).

Os coagulantes inorgânicos são amplamente utilizados e para tratamento de efluentes de frigoríficos os mais utilizados são compostos por sais de alumínio e ferro. Os coagulantes mais utilizados comercialmente para tratamento de efluentes líquidos e suas faixas de pH para melhor coagulação são mostrados na TABELA 1 – PRINCIPAIS COAGULANTES PARA FLOTAÇÃO E SUAS RESPECTIVAS FAIXAS DE PH ÓTIMO TABELA 1.

TABELA 1 – PRINCIPAIS COAGULANTES PARA FLOTAÇÃO E SUAS RESPECTIVAS FAIXAS DE PH ÓTIMO

Coagulante	Faixa de pH
Cloreto Férrico	5,0 a 11,0
PAC (Policloreto de Alumínio)	3,0 a 11,0
PoliDADMAC	5,0 a 8,0
Sulfato de Alumínio	5,0 a 8,0
Sulfato Ferroso	8,5 a 11,0
Sulfato Férrico	5,0 a 11,0

FONTE: Adaptado de Pavanelli (2001) e Mantovan (2022).

O Cloreto Férrico ( $\text{FeCl}_3$ ) é um coagulante inorgânico amplamente utilizado no tratamento de efluentes industriais (Nunes, 2012). Segundo Pavanelli (2001), a reação a quente do ácido clorídrico concentrado com o minério de ferro (hematita– $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), seguido de resfriamento e filtração, proporciona a produção de cloreto férrico ( $\text{FeCl}_3$ ). Sua concentração final é em torno de 40% em peso de  $\text{FeCl}_3$ .

O  $\text{FeCl}_3$  na forma líquida apresenta cor marrom avermelhado com pH próximo de 2,0 (a 20 °C) e densidade variável de 1,380 a 1,420 g/cm<sup>3</sup> padronizar a forma de expressar as unidades (Franciozi, 2020). A hidrólise do cloreto férrico produz hidróxido de ferro, que possui ação coagulante sobre as partículas. Esta reação pode ser observada na equação (1):



Sua utilização tem grande eficiência na redução de DBO e DQO, quantidade de sólidos suspensos, cor, turbidez, óleos e graxas no efluente após a coagulação/floculação (Fagnani, 2017).

No entanto, o lodo produzido utilizando coagulantes à base de sais de ferro ou alumínio possuem íons metálicos e tem sua disposição final dificultada, sendo assim não são desejáveis, pois apresentam maior risco de contaminação. O volume de lodo gerado nesse processo também é maior do que comparado a processos que utilizam coagulantes orgânicos (Ferreira, 2012; Lo Monaco *et al.*, 2010).

No Brasil, um dos coagulantes mais utilizados é o Sulfato de Alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ). Ele é um coagulante orgânico sólido cristalino, de cor branca-acinzentada. Possui aproximadamente 17% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  solúvel em água (Bassin; Dezotti, 2008). O sulfato de alumínio é fácil de transportar e manejar, é eficiente e tem baixo custo (Hanauer *et al.*, 2019).

A desvantagem em seu uso é referente a concentração de alumínio residual presente no lodo ao fim do tratamento, pois é tóxico para microorganismos e plantas (Lin; Couperthwaite; Millar, 2017; Matos *et al.*, 2007).

Os taninos são definidos quimicamente como polímeros polihidroxifenólicos, solúveis em água, de baixo peso molecular. São encontrados em folhas, frutos, raízes e cascas, sendo as cascas sua principal fonte para extração. Eles são classificados em hidrolisáveis, compostos por poliésteres cuja unidade básica é o ácido gálico, que pode estar associado a estruturas glicosídicas; e em condensados, formados por unidades monoméricas de flavonoides do tipo flavan-3-ol ou flavan-3,4-diol (Arcila; Peralta, 2016; Mangrich *et al.*, 2014; TANAC, 2016).

Os taninos têm capacidade de neutralizar cargas superficiais de partículas coloidais em suspensão, promovendo sua aglomeração e sedimentação. Por essa característica, os taninos são aproveitados no setor de saneamento. Eles são

constituintes de coagulantes e floculantes poliméricos catiônicos e são empregados na clarificação, no tratamento de águas residuárias e águas para consumo humano (Coral, Bergamasco; Bassetti, 2009).

No Brasil, o tanino empregado como coagulante é extraído da *Acacia mearnsii* (acácia negra), que tem origem australiana e no Brasil é cultivada somente no Rio Grande do Sul (Mangrich *et al.*, 2014).

O uso de coagulantes orgânicos no tratamento de efluentes tem sido estudado nas últimas décadas (Pozzobon; Kempka, 2015; Schmitt *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2012; Ströher *et al.*, 2013; Vaz *et al.*, 2010). Seu uso tem mostrado diversas vantagens quando comparado aos coagulantes químicos em relação à biodegradabilidade, baixa toxicidade e baixo índice de produção de lodo (Ferrari; Genena; Lenhard, 2016; Yin, 2010).

Um coagulante orgânico utilizado é o poliDADMAC, nome comercial do polidialildimetilamônio. Poliaminas e polidialildimetilamônio são amplamente empregados nos processos de coagulação e sedimentação, pois exercem pouco impacto no pH da água (Bae *et al.*, 2007).

### 2.2.2 Processo de flotação

A flotação é um processo de separação que utiliza bolhas de gás (ar) para transportar partículas suspensas. Essas partículas, que são hidrofóbicas ou previamente condicionadas, aderem às bolhas, formando aglomerados de densidade semelhante à da água. Isso faz com que flutuem até a superfície, onde se forma uma camada de lodo que aumenta de espessura e é removida por raspagem superficial (Kyzas; Matis, 2018).

Para o tratamento de efluentes é utilizada a flotação por ar dissolvido (FAD) (Kyzas; Matis, 2018). Os sistemas de FAD possuem um tanque de pressurização com injeção de ar. Esses sistemas, em comparação com a filtração e as tecnologias de membranas, são considerados de custo moderado e são eficientes, pois utilizam menos ar e coagulantes/floculantes, apresentam curto tempo de retenção e superfícies com alta carga hidráulica, o que garante boa eficiência de separação e baixo custo operacional (Ortiz-Oliveros; Flores-Espinosa, 2019).

Na FAD há a injeção de microbolhas formadas por ar pressurizado. Essas microbolhas fazem com que o material particulado se separe e ascenda até a

superfície (Filho, 2017). As bolhas de ar são fundamentais para o transporte das partículas suspensas à superfície do tanque de flotação. Seu diâmetro é significativo no processo de flotação por ar dissolvido, já que influencia na separação da mistura em contato com o ar (Gardusi *et al.*, 2014; Penna *et al.*, 2003).

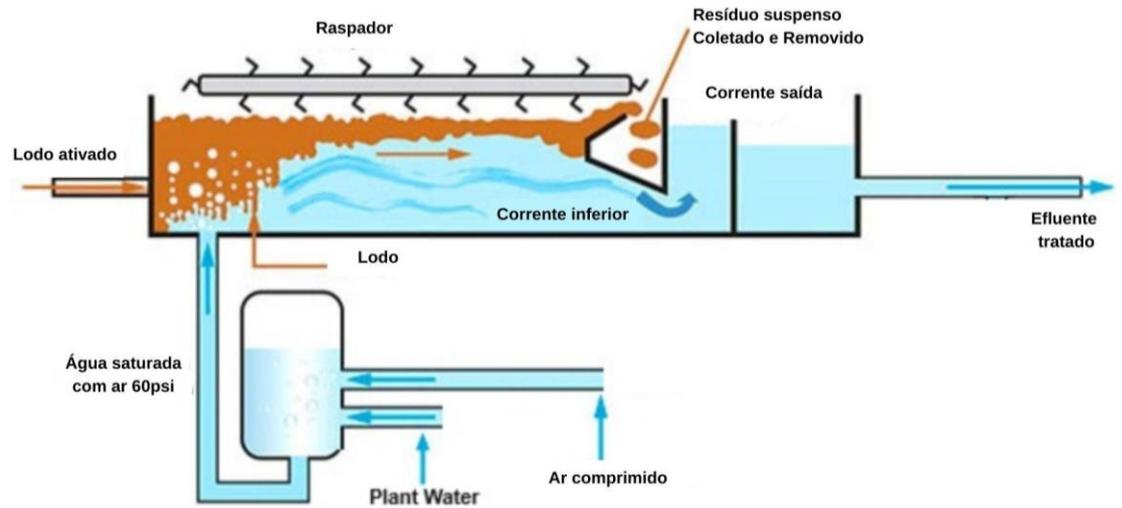
O tamanho das bolhas é ajustado e controlando a pressão e vazão de ar liberado. Um número maior de bolhas com menor diâmetro proporciona uma área superficial maior do que um número menor de bolhas de maior diâmetro. Portanto, um número maior de bolhas, de menor diâmetro facilita a coleta das partículas suspensas, sendo assim o processo de flotação se torna mais eficiente. No entanto, bolhas com diâmetro muito pequeno apresentam velocidade de ascensão baixa, que pode causar perda de partículas hidrofóbicas durante o escoamento do material flotado (Penna *et al.*, 2003).

Na flotação, os processos são subdivididos em zonas. Na primeira zona, chamada de zona de contato, as microbolhas de ar são injetadas na parte inferior do tanque, juntamente com o efluente coagulado. Nessa região, ocorrem processos de adesão e colisão entre as microbolhas e os flocos, formando aglomerados com densidade relativa menor. Assim, esses aglomerados ascendem à superfície (Fonseca, 2017).

Em seguida, o efluente e as camadas das partículas flotadas são direcionados ao defletor, entrando na zona de separação. Nesta etapa, o lodo é removido usando um raspador e a água clarificada permanece no fundo do tanque. Uma parte do efluente tratado é usado para alimentar os vasos de saturação onde ocorre a injeção de ar comprimido para ser dissolvido na água que será recirculada (Filho, 2017).

Na FIGURA 3 é possível observar um esquema de processo de FAD e na FIGURA 4 é possível verificar a imagem de um flotador industrial.

FIGURA 3 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM FLOTADOR INDUSTRIAL



FONTE: UBCW (s. d.).

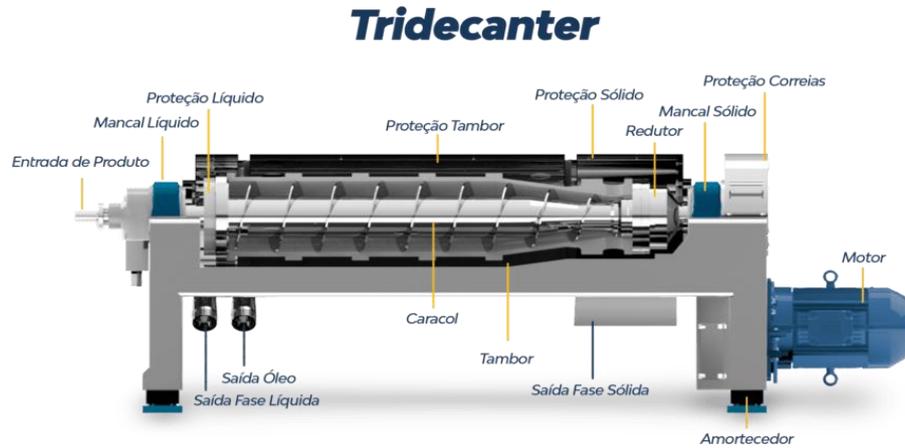
FIGURA 4 – FLOTADOR INDUSTRIAL



FONTE: SULMETAX (2024).

O lodo gerado no tanque de flotação é submetido a um processo de aquecimento a 95°C por 30 minutos. Após o aquecimento, o material é centrifugado em uma Centrífuga Tridecanter, mostrada na FIGURA 5, a uma velocidade de 280 rpm, resultando na separação em três fases: óleo ácido (gordura), clarificado (água residual) e lodo desidratado que é o material de estudo deste trabalho (Fagnani, 2017).

FIGURA 5 – CENTRÍFUGA TRIDECANTER



FONTE: Fast Tecnologia Industrial (2024).

### 2.3 IMPORTÂNCIA DO REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS INDUSTRIAIS

O reaproveitamento de resíduos industriais, especialmente em indústrias de abate de animais, é importante para a sustentabilidade e para a redução de impactos ambientais (Guimarães; Galvão, 2013). Ao transformar lodo flotado em uma fonte de energia através da queima controlada, a indústria não apenas diminui a quantidade de resíduos gerados, evitando a saturação de aterros e minimizando a poluição do solo e da água, mas também reduz sua dependência de fontes fósseis (Virmond *et al.*, 2007). Esse processo contribui para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa, melhorando a qualidade do ar e combatendo as mudanças climáticas. Além disso, a valorização energética e o reaproveitamento de resíduos resultam em economia de recursos, reduzindo custos associados à compra de matérias-primas e ao descarte de resíduos, o que, por sua vez, melhora a eficiência econômica da operação (Azevedo *et al.*, 2023; Silva-Martínez *et al.*, 2020).

Empresas que adotam essas práticas demonstram um compromisso com a responsabilidade ambiental, o que pode atrair consumidores conscientes e melhorar sua imagem corporativa. Essa abordagem não só atende às exigências de conformidade com normas ambientais, evitando multas e penalizações, mas também impulsiona a inovação tecnológica, levando a processos mais eficientes e sustentáveis (Chan *et al.*, 2023). Assim, o reaproveitamento de lodo flotado em indústrias de proteína animal se apresenta como uma estratégia eficaz que beneficia tanto a indústria quanto a sociedade, promovendo uma economia circular e sustentável (Jellali *et al.*, 2023).

## 2.4 COMPOSIÇÃO DO LODO FLOTADO ORIUNDO DE AGROINDÚSTRIA DE PROTEÍNA ANIMAL PARA FINS ENERGÉTICOS

Saber a composição do lodo flotado da agroindústria de proteína animal é fundamental para diversas aplicações, especialmente quando se trata de processos de conversão energética ou tratamento de resíduos, pois a proporção de componentes combustíveis afeta diretamente o poder calorífico. A caracterização química de um combustível sólido é a etapa mais importante para determinar sua aplicação (Vassilev *et al.*, 2010).

Os principais métodos utilizados para análise da composição de combustíveis sólidos incluem análise imediata, análise elementar e determinação do poder calorífico (Basu, 2018). A análise imediata, amplamente empregada em estudos de resíduos orgânicos, avalia parâmetros como umidade, teor de cinzas, material volátil e carbono fixo, fornecendo informações sobre o potencial energético do material (Crnkovic *et al.*, 2004). Já a análise elementar identifica a composição de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio, essenciais para estimar tanto o potencial de combustão quanto a viabilidade de processos bioquímicos, como a geração de biogás (Gentil, 2008). Por fim, o poder calorífico, dividido em Poder Calorífico Superior (PCS) e Inferior (PCI), mede a energia liberada na combustão completa de um combustível sólido (Quirino *et al.*, 2005).

Estudos específicos mostram a relevância dessas análises para o lodo flotado. Segundo Fagnani *et al.* (2019), o teor de umidade do lodo, após passar pela Centrífuga Tridecanter, é de aproximadamente 60%, o que reforça sua destinação preferencial a processos bioquímicos. No entanto, trabalhos como o de Sena *et al.* (2007) destacam que, apesar da alta umidade, o lodo possui um considerável poder calorífico, com elevada presença de carbono, nitrogênio e oxigênio, mas também um alto teor de cinzas, quando comparado a materiais como serragem.

Uma dificuldade no uso do lodo para queima em caldeiras está relacionada à formação de incrustações. Essas incrustações afetam diretamente a eficiência energética do sistema, interferindo na transferência de calor. Isso exige que o sistema de aquecimento trabalhe mais para produzir vapor, acarretando maior consumo de combustível (Zarpelon e Azzolini, 2015). A propensão de um combustível à formação de incrustações é medida pelo índice de incrustação.

Pronobis (2005) afirma que quanto maior o índice, mais propenso é o combustível a formar incrustações. Nesse contexto, Mantovan *et al.* (2022) avaliou lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes e constatou que esses lodos apresentam maior tendência à formação de incrustações do que o cavaco de eucalipto.

Além disso, a presença de metais pesados, como zinco e cádmio, ou outros compostos tóxicos, deve ser monitorada. Essa avaliação é indispensável para evitar contaminações ambientais e garantir que o uso do lodo — seja como combustível, seja em outros processos — esteja em conformidade com regulamentações ambientais (Mantovan *et al.*, 2022). Assim, a caracterização completa do lodo não apenas orienta sua aplicação mais adequada, mas também assegura práticas sustentáveis no manejo deste resíduo.

#### 2.4.1 Teor de umidade

O teor de umidade é definido como a massa de água contida na biomassa. Pode ser expresso em base úmida (bu) como em base seca (bs). Ele é avaliado pela diferença entre as massas de uma amostra antes e logo em seguida de sua secagem (Nogueira e Rendeiro, 2008).

A umidade é um dos indicadores qualitativos principais para o cálculo do preço final a ser pago por kJ de biomassa. Quanto maior o teor de umidade, menor é o valor da energia produzida por um combustível. Alta quantidade de água diminui a energia obtida na combustão (Deboni *et al.*, 2019; Trugilho, 2012).

Segundo Schutz, Anami e Travessini (2010), a umidade é uma das características mais importantes do material combustível, influenciando diretamente na eficiência energética do equipamento. Por isso, quanto menor o teor de umidade de um combustível, maior será a quantidade de calor liberado na combustão.

Sendo assim, biomassas com teor de umidade maior que 50% devem preferencialmente ser destinadas a processos bioquímicos como biodigestão, pois esse processo se beneficia de altos teores de umidade porque cria condições ideais para a sobrevivência e atividade de microrganismos anaeróbios (Moktadir; Ren; Zhou, 2023). Esses organismos utilizam a matéria orgânica presente na biomassa para produzir biogás, aproveitando a matriz aquosa como meio de transporte e sustentação para nutrientes (Brasil, 2021).

#### 2.4.2 Análise imediata

A análise imediata é um experimento realizado em amostras de biomassa ou combustíveis sólidos que possibilita determinar a composição básica da amostra, oferecendo informações sobre umidade, carbono fixo, materiais voláteis e cinzas.

O teor de umidade indica a quantidade de água da amostra e é uma das características mais importantes para caracterização da biomassa, pois quando o teor de umidade é alto isso impacta negativamente a combustão e reduz a eficiência energética. No entanto, o teor de umidade obtido na análise imediata não reflete fielmente a amostra que será utilizada na caldeira, pois é muito manipulada na preparação. O carbono fixo representa a porção da amostra que não se volatiliza com aquecimento, impactando positivamente a eficiência energética do combustível. Os materiais voláteis são a porção que volatiliza quando aquecido. O teor de cinzas se refere a parcela inorgânica da amostra e permanece após a combustão, indicando a quantidade de impurezas no material (Brito; Barrichelo, 1978; Ponte, 2017).

A análise imediata é feita utilizando métodos normalizados. O teor de umidade total é mensurado conforme a norma técnica NBR 8293 (ABNT, 1983). Ele é medido pela diferença de massa do material seco em estufa a 105 °C durante uma hora, garantindo-se a ausência de ar (Neto, 2012).

O teor de cinzas, correspondente ao resíduo inorgânico remanescente, pode ser determinado conforme a norma ABNT NBR 8289 (ABNT, 1983), que orienta a combustão da amostra em forno mufla, sob atmosfera oxidante, a 815 °C (ou 600 °C para biomassa), até atingir a combustão total. Após a queima, a massa do resíduo restante é medida para o cálculo do teor de cinzas (Neto, 2012).

Os materiais voláteis incluem todos os componentes, exceto a umidade, que são liberados de um material, como gases, hidrocarbonetos e água de constituição, em diferentes proporções. Durante a combustão, o teor de materiais voláteis, juntamente com parâmetros como teor de cinzas, carbono fixo e poder calorífico, desempenha um papel essencial na eficiência do processo. Materiais com elevado teor de voláteis geralmente apresentam uma queima mais rápida em comparação com aqueles com baixo teor de voláteis. A metodologia, conforme descrita na ABNT NBR 8290 (ABNT, 1983), fundamenta-se na determinação dos materiais voláteis

liberados de combustíveis sólidos durante o aquecimento em forno elétrico (vertical ou horizontal) a 950 °C, em atmosfera isenta de oxigênio, com rigoroso controle de massa, temperatura e tempo (7 minutos) (Neto, 2012).

O carbono fixo representa a concentração de carbono, apesar de conter também outros elementos como enxofre, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio. É um parâmetro importante para os cálculos de balanço de energia e na caracterização de combustíveis sólidos. Os teores de carbono fixo são expressos em percentuais. Uma norma utilizada é a norma ABNT NBR 8299 (ABNT, 1983), que recomenda o cálculo do teor de carbono fixo a partir de teores de cinzas, materiais voláteis e umidade, conforme a equação (2) (Neto, 2012).

$$CF = 100 - (umidade + cinzas + materiais voláteis) \quad (2)$$

Os resultados obtidos da análise em base úmida (bu) podem ser expressos em base seca (bs) como mostrado na equação (3) (Neto, 2012).

$$base\ seca = \frac{base\ úmida \times 100}{100 - umidade} \quad (3)$$

Na TABELA 2, é possível observar a composição de lodo tratado, de diversos trabalhos com diferentes coagulantes, obtida a partir das análises imediatas.

TABELA 2 – RESULTADO DAS ANÁLISES IMEDIATAS DOS TRABALHOS ANALISADOS  
(continua)

<b>Coagulante</b>	<b>Umidade %</b>	<b>Material volátil %</b>	<b>Cinzas %</b>	<b>Carbono Fixo %</b>	<b>Autor</b>
Cloreto Férrico	6,7	85,6	4,2	7,5	Andriola, 2023
Cloreto Férrico	61,7	92,7	7,0	6,8	Mantovan, 2022
Cloreto Férrico	64,7	92,9	7,9	6,5	Mantovan, 2022
Cloreto Férrico	68,7	92,9	8,3	6,5	Mantovan, 2022
Policloreto de Alumínio	15,7	82,7	12,2	17,1	Padilha, 2019
Cloreto Férrico	62,5	82,3	9,0	8,6	Fagnani, 2017

TABELA 2 – RESULTADO DAS ANÁLISES IMEDIATAS DOS TRABALHOS ANALISADOS  
(conclusão)

Coagulante	Umidade %	Material volátil %	Cinzas %	Carbono Fixo %	Autor
Coagulante orgânico poliDADMAC	59,4	84,6	4,2	11,2	Fagnani, 2017
Sulfato Férrico	15,0	85,3	12,3	9,6	Virmond <i>et al.</i> , 2011
Coagulante não especificado	21,0	85,6	10,4	14,4	Virmond <i>et al.</i> , 2011
Coagulante não especificado	25,8	79,7	4,3	20,3	Floriani <i>et al.</i> , 2010
Cloreto Férrico	70,0	85,7	5,7	14,3	Sena <i>et al.</i> , 2007
Sulfato Férrico	15,0	84,2	11,7	15,8	Sena <i>et al.</i> , 2007
Coagulante não especificado	15,0	74,8	12,3	8,4	Virmond, 2007
Cloreto Férrico	70,0	80,8	5,7	13,5	Sena, 2005

FONTE: A autora (2024).

#### 2.4.3 Análise elementar

Conhecer a composição química do combustível é fundamental para quantificar a relação ar-combustível e prever a composição dos gases provenientes da combustão ou gaseificação (Rendeiro e Nogueira, 2008). A análise elementar fornece valores dos elementos orgânicos do combustível. São eles: carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S) (Sarkar, 2015).

O funcionamento da técnica é baseado no método de Pregl-Dumas, onde as amostras sofrem combustão em uma atmosfera de oxigênio puro, e os gases oriundos dessa combustão são quantificados em um detector TCD (detector de condutividade térmica) (Central Analítica, 2024).

O percentual de carbono está diretamente relacionado ao poder calorífico, portanto para um combustível é desejável um valor elevado. Quanto maior o teor de carbono, maior a quantidade de energia liberada durante a combustão. O hidrogênio também contribui para o poder calorífico, já que durante a combustão o hidrogênio forma vapor d'água, liberando calor. Em relação ao oxigênio, para um combustível é desejável um nível moderado, pois o oxigênio presente no combustível não participa

da combustão e torna o processo menos eficiente. O nitrogênio por sua vez, não contribui para o poder calorífico e quando presente em grandes quantidades pode formar óxidos de nitrogênio (NOx), que são poluentes. Níveis de enxofre devem ser mínimos pois sua combustão resulta na emissão de óxidos de enxofre (SOx), que são poluentes que causam chuva ácida e outros impactos ambientais negativos (Teng *et al.*, 2024). Na TABELA 3 podemos verificar valores de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio, cloro e flúor referentes a amostras de lodo tratados provenientes dos estudos analisados.

TABELA 3 – RESULTADOS DE ANÁLISE ELEMENTAR DAS AMOSTRAS DE LODO

Coagulante	C %	H %	N %	S %	O %	Cl %	F %	Autor
<b>Cloreto Férrico</b>	58,6	9,3	7,3	0,7	24,2	0,02	<0,003	Mantovan, 2022
<b>Cloreto Férrico</b>	57,2	9,0	7,9	0,6	25,3	0,03	<0,003	Mantovan, 2022
<b>Cloreto Férrico</b>	46,4	8,9	7,8	0,8	26,2	0,03	<0,003	Mantovan, 2022
<b>Cloreto Férrico</b>	58,6	9,3	7,3	0,7	24,2	0,02	<0,003	Mantovan, 2022
<b>Cloreto Férrico</b>	57,2	9,0	7,9	0,6	25,3	0,03	<0,003	Mantovan, 2022
<b>Cloreto Férrico</b>	46,4	8,9	7,8	0,8	26,2	0,03	<0,003	Mantovan, 2022
<b>Cloreto Férrico</b>	20,6	9,5	2,5	-	-	-	-	Fagnani, 2017
<b>Coagulante Orgânico poliDADMAC</b>	23,2	9,7	2,8	-	-	-	-	Fagnani, 2017
<b>Coagulante não especificado</b>	50,9	7,9	8,1	<0,3	20,2	0,16	-	Virmond, 2007
<b>Cloreto Férrico</b>	54,6	7,6	8,22	-	23,8	-	-	Sena, 2005
<b>Sulfato Férrico</b>	57,8	7,6	5,99	0,62	22,6	-	-	Sena, 2005

FONTE: A autora (2024).

#### 2.4.4 Poder calorífico

O poder calorífico (PC) é a quantidade de energia liberada quando uma determinada quantidade de combustível é queimada completamente. O PC é dividido em Poder Calorífico Inferior (PCI) e Poder Calorífico Superior (PCS). O PCI se refere à energia disponível a partir da combustão do combustível, excluindo a energia liberada pela condensação do vapor de água. O PCS refere-se à

quantidade total de energia liberada quando o combustível é completamente queimado, incluindo o calor latente da vaporização da água. Ou seja, o PCS considera a energia gerada tanto pelo combustível quanto pela condensação do vapor de água formado durante a combustão. O PCI é menor que o PCS justamente por não considerar o calor latente da vaporização da água (Jeon *et al.*, 2024).

Para determinar o PC, são utilizados uma bomba calorimétrica e um calorímetro. A amostra do combustível é colocada em um cadinho montado dentro da bomba calorimétrica, com volume de 350 mL, dotada de um dispositivo de ignição através de corrente elétrica. A massa da amostra é estimada a partir da equação (4) (Poli *et al.*, 2013).

$$m_a = \frac{6318}{PCI_a} \quad (4)$$

onde:

$m_a$  = massa da amostra;

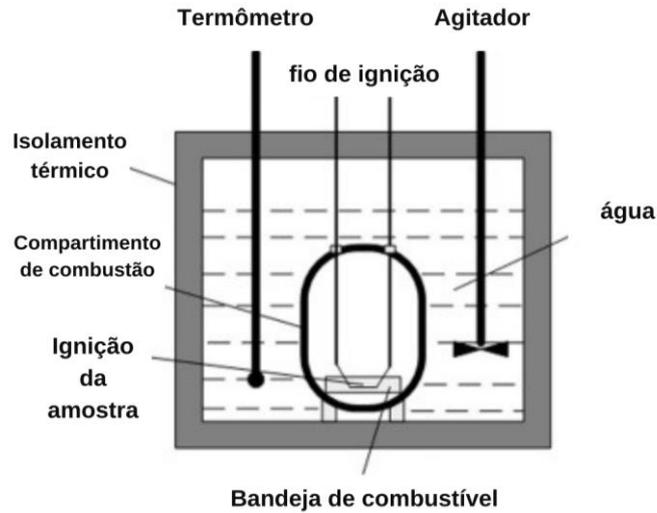
6318 = constante equivalente à energia de 1g da substância-padrão de calibração do calorímetro (ácido benzóico) [cal];

$PCI_a$  = Poder Calorífico Inferior estimado para a amostra [cal/g].

Sabendo o poder calorífico estimado para aquele combustível, determina-se a massa da amostra pela equação (4). Após colocar a amostra, a bomba é fechada hermeticamente e pressurizada com Oxigênio puro a cerca de 25 atm (Poli *et al.*, 2013).

Em seguida, a bomba calorimétrica é instalada dentro do calorímetro, que é composto por um vaso termicamente isolado do ambiente, preenchido com água, com um agitador para homogeneizar a temperatura do conjunto antes da queima e um termômetro de alta precisão, para medir o ganho de temperatura do conjunto, conforme a FIGURA 6 (Poli *et al.*, 2013).

FIGURA 6 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DE UMA BOMBA CALORIMÉTRICA



FONTE: Adaptado de Kiang (2018).

Com base no valor estimado para o PC, a temperatura inicial do banho de água é ajustada para que, após a combustão, a temperatura final do sistema atinja 25 °C. Em seguida, um pulso elétrico ativa o dispositivo de ignição, provocando a queima da amostra e o consequente aumento da temperatura do conjunto. A elevação de temperatura, medida com precisão de  $\pm 0,002$  °C, é utilizada, juntamente com calibrações anteriores realizadas com substâncias de PC conhecido, e com correções aplicadas para as massas de água, calorímetro, bomba calorimétrica, e energia de ignição, para calcular o ganho de energia do sistema. Esse ganho de energia, quando dividido pela massa da amostra (determinada com precisão de  $\pm 0,1$  mg), fornece o valor do PCS. Já o PCI é obtido a partir do valor de PCS conforme mostra a equação (5) (Poli *et al.*, 2013).

$$PCI = PCS - (n \times \Delta H_{vap}) \quad (5)$$

Onde:

$n$  = quantidade de água formada durante a combustão, geralmente expressa em gramas;

$\Delta H_{vap}$  = calor de vaporização da água, que é aproximadamente 44 kJ/mol (ou 2.442 kJ/kg) a 25 °C (Poli *et al.*, 2013).

Na TABELA 4 é possível verificar valores de PCS e PCI para alguns combustíveis sólidos usados em caldeiras industriais, como cavaco e pellets.

TABELA 4 – VALORES DE PCS E PCI PARA COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

Combustível Sólido	PCS [MJ/kg]	PCI [MJ/kg]	Fonte
Cavaco (eucalipto)	18,0	17,5	Borges, 2015
Carvão vegetal	28,6	28,4	Engineering Toolbox, 2003
Pellets (maravalha de Pinus)	20,2	18,9	Camargo <i>et al.</i> , 2017
Bagaço de cana-de-açúcar	19,4	16,2	Correia <i>et al.</i> , 2020

Fonte: A autora (2024).

Na TABELA 5, é possível observar valores de PCS e PCI para amostras de Lodo dos trabalhos analisados, com diferentes coagulantes e também lodo misturado com biomassa, como nas amostras Cloreto Férrico I, Cloreto Férrico II e Cloreto Férrico III que são referentes ao lodo misturado com 10%, 20% e 30% de cavaco respectivamente. O mesmo acontece para amostras de lodo com coagulante PoliDADMAC, que as amostras PoliDADMAC I, PoliDADMAC II e PoliDADMAC III são referentes à mistura de lodo com 10%, 20% e 30% de cavaco.

TABELA 5 – PODER CALORÍFICO INFERIOR E PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO LODO FLOTADO

Coagulante	PCS [MJ/kg]	PCI [MJ/kg]	Autor
Cloreto Férrico	27,9	25,9	Mantovan, 2022
Cloreto Férrico	27,5	25,5	Mantovan, 2022
Cloreto Férrico	27,2	25,2	Mantovan, 2022
Cloreto Férrico 10	19,5	-	Fagnani, 2017
Cloreto Férrico 20	20,0	-	Fagnani, 2017
Cloreto Férrico 30	20,5	-	Fagnani, 2017
PoliDADMAC 10	19,6	-	Fagnani, 2017
PoliDADMAC 20	20,3	-	Fagnani, 2017
PoliDADMAC 30	21,8	-	Fagnani, 2017

TABELA 5 – PODER CALORÍFICO INFERIOR E PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO LODO FLOTADO

(conclusão)

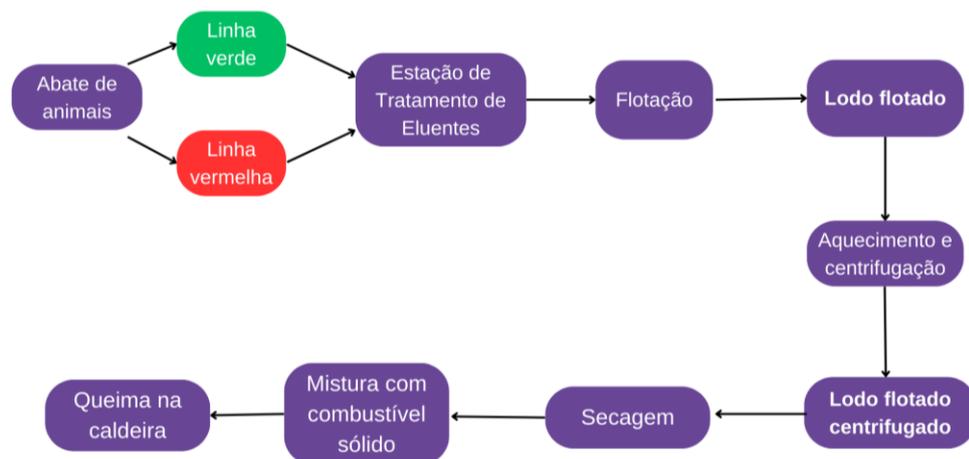
Coagulante	PCS [MJ/kg]	PCI [MJ/kg]	Autor
Correto Férrico	26,6	-	Fagnani, 2017
PoliDADMAC	27,6	-	Fagnani, 2017
-	24,4	22,6	Virmond, 2007
Cloreto Férrico	23,3	25,0	Sena, 2005
Sulfato Férrico	24,5	26,2	Sena, 2005

Fonte: A autora (2024).

## 2.5 TRATAMENTO DO LODO FLOTADO PARA UTILIZAÇÃO ENERGÉTICA POR QUEIMA

Devido a origem do lodo flotado ser os efluentes e resíduos dos processos industriais, são necessários pré-tratamentos para poder ser utilizado como fonte energética. Na FIGURA 7, é possível observar os processos desde a geração do efluente no abate de animais até sua destinação final da caldeira.

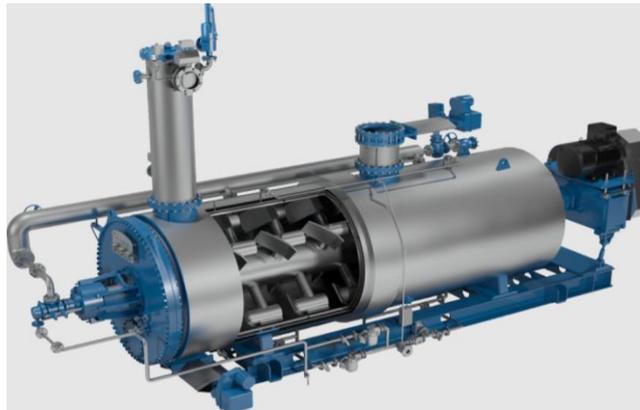
FIGURA 7 – ETAPAS DO PROCESSO DO LODO FLOTADO DESDE O EFLUENTE ATÉ A CALDEIRA



FONTE: A autora (2024).

O alto teor de umidade do lodo pode intervir no processo de combustão. Portanto é necessário realizar sua secagem, diminuindo seu teor de umidade de aproximadamente 60% para 15 – 20% (Padilha *et al.*, 2019; Sena *et al.*, 2007; Virmond *et al.*, 2011). A secagem pode ser realizada em digestores em batelada, mostrado na FIGURA 8, ou digestores contínuos.

FIGURA 8 – DIGESTOR BATELADA



FONTE: Haarslev (2024).

Após sua secagem, o lodo é misturado com o combustível principal que pode ser cavaco, serragem ou outra biomassa e pode ser queimado em caldeira. No entanto, a resolução de número 042/08 da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA), determina que a quantidade máxima de um resíduo sólido em mistura com o combustível principal para queima em caldeira não pode ultrapassar 20% do peso da mistura e 20% do poder calorífico total da mistura (SEMA, 2008).

As emissões provenientes da caldeira devem obedecer aos parâmetros de emissão estabelecidos pela Resolução nº 382/06 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que fixa os limites máximos para a emissão de poluentes no ar (CONAMA, 2006).

Outra forma de tratamento do lodo para utilização energética é a torrefação que se trata de um tratamento térmico da biomassa para produzir um combustível com melhores características energéticas. Este tratamento tem por característica a ausência parcial ou completa de ar, portanto, é uma fase inicial da pirólise (Rodrigues, 2009).

Na pirólise, a temperatura varia de 300 °C a 900 °C, e o lodo é convertido em cinzas, carbono fixo, bio-óleos, vapores de água e gases combustíveis. Além disso, com relação às emissões de gases, a pirólise é uma técnica amigável ao meio ambiente quando comparada com a combustão (Gurunani *et al.*, 2022). O material sólido gerado nesse processo, tem maior poder de queima que o lodo flotado usado como matéria prima.

## 2.6 APLICAÇÕES DO LODO FLOTADO EM CALDEIRAS

A caldeira industrial é um equipamento que converte a energia de um combustível em energia térmica na forma de vapor e ou água quente por meio da combustão. O equipamento é mostrado na FIGURA 9. Segundo a norma NR13, elaborada pelo Ministério do Trabalho e Emprego (1978), as caldeiras industriais a vapor “são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, excetuando-se refervedores e similares.”

FIGURA 9 – CALDEIRA INDUSTRIAL



FONTE: ICAVI (2024).

A combustão é um processo químico de oxidação exotérmica que ocorre entre um combustível e um comburente. Durante essa reação, os elementos presentes no combustível, principalmente o carbono (C) e o hidrogênio (H), reagem

com o oxigênio (O), liberando energia térmica. O oxigênio necessário para a combustão é obtido do ar atmosférico, que é composto por aproximadamente 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio (N<sub>2</sub>) em volume, na sua forma seca. O nitrogênio, embora não participe diretamente da combustão, influencia as características da reação devido à sua presença majoritária na composição do ar (Çengel *et al.*, 2019).

A combustão de sólidos ocorre em 4 fases: aquecimento e secagem, pirólise, combustão e pós-combustão. No aquecimento e secagem, acontece a remoção da umidade por evaporação da água. Na pirólise, acontece a liberação dos gases inflamáveis, que quando misturados com o oxigênio do ar em proporções adequadas, geram uma mistura inflamável. Na combustão, os gases formados na pirólise reagem com o oxigênio numa reação exotérmica, que tem como produtos o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor d'água (H<sub>2</sub>O), nitrogênio (N<sub>2</sub>) e calor. Após a combustão dos gases voláteis, acontece a queima do carbono fixo. Na pós-combustão, o combustível sólido se transforma em uma massa sólida composta de carvão e cinza. Uma fração do carbono e cinzas é gaseificada formando CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, entre outros gases, já o restante é removido como resíduo (Rendeiro e Nogueira, 2008).

Os principais combustíveis sólidos usados em caldeiras industriais são lenha, cavaco de madeira, bagaço de cana e carvão (Botelho e Biffano, 2015). Fagnani *et al.* (2019) utilizou uma mistura de 10% em massa de lodo proveniente do abate de aves e 90% de cavaco em escala real. A caldeira usada no teste tinha uma capacidade de geração de vapor de 10 toneladas por hora e era alimentada principalmente por cavacos de madeira. A adição de lodo melhorou a estabilidade da pressão da caldeira e reduziu a velocidade da rosca de alimentação de combustível.

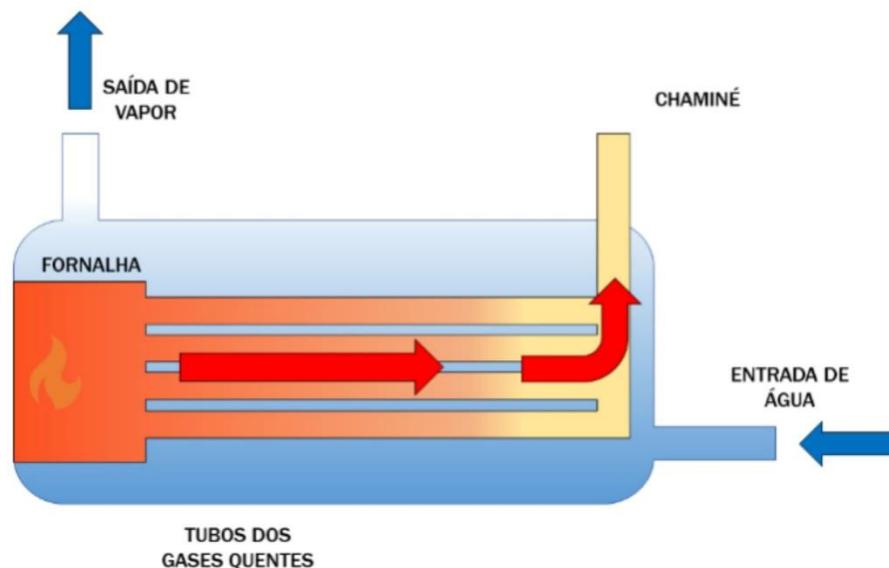
Para a queima de combustíveis sólidos, geralmente são empregadas fornalhas de leito fixo equipadas com grelhas, que são responsáveis por servir de leito para a queima e têm a finalidade de realizar a queima total do combustível. Para combustíveis gasosos, líquidos ou sólidos com uma pequena granulometria, são utilizadas outras tecnologias, como queimadores e pulverizadores (Bazzo, 1995).

Além da fornalha e grelha, as caldeiras possuem tubos internos que podem transportar água ou gases quentes de combustão, equipamentos de exaustão dos gases quentes. Existem três classificações de caldeiras quanto ao escoamento dos

fluidos e seus aspectos construtivos. Elas são: caldeiras aquatubulares, caldeiras flamotubulares e caldeiras mistas (Bizzo, 2003).

Nas caldeiras flamotubulares, como é possível observar na FIGURA 10, os gases de combustão oriundos da queima de combustível na fornalha escoam internamente aos tubos, nos quais, ocorre a transformação de água em vapor a partir do escoamento dos gases (Filho, 2014).

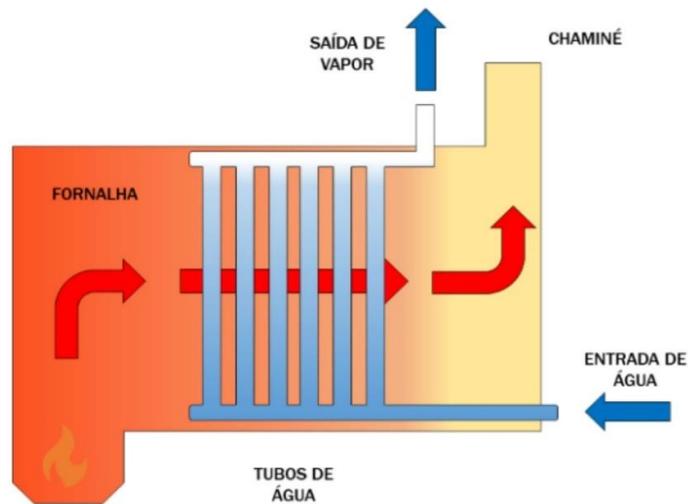
FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DE UMA CALDEIRA FLAMOTUBULAR



FONTE: Adaptado de Togawa (2020).

As caldeiras flamotubulares são as mais utilizadas para demandas menores de vapor, em torno de 10 ton/h, a baixas pressões chegando até 20 bar. Como grande parte do calor fornecido pela fornalha nesses equipamentos é proveniente de combustíveis líquidos ou gasosos, fica impossibilitado o uso do lodo flotado como combustível, tendo em vista sua complexidade (Bizzo, 2003). Nas caldeiras aquatubulares, a mudança de fase ocorre no lado interno dos tubos a partir da transferência de calor dos gases que escoam na parte externa, como é possível observar na FIGURA 11 (Bizzo, 2003).

FIGURA 11 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA CALDEIRA AQUATUBULAR.

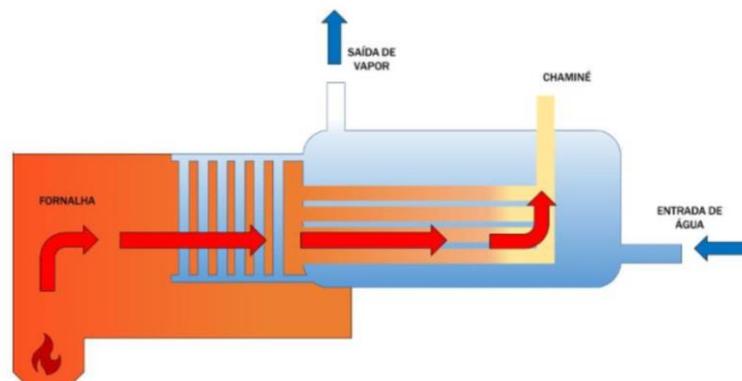


FONTE: Adaptado de Togawa (2020).

Esse tipo de caldeira permite maiores pressões de trabalho do que as caldeiras flamotubulares, podendo chegar a uma capacidade de 150 ton/h com elevadas pressões (Filho, 2014). No entanto, nas caldeiras aquatubulares há deposição de sedimentos provenientes do processo evaporativo, sendo necessário a extração periódica de sedimentos através de descargas de fundo (Bizzo, 2003).

As caldeiras com configuração mista surgem pela necessidade de utilização de combustíveis sólidos em caldeiras com baixas pressões e grande demanda de vapor, unindo assim as vantagens das caldeiras aquatubulares e caldeiras flamotubulares. Elas são uma solução prática para combustíveis sólidos com baixo custo, sendo possível ainda a queima de combustíveis líquidos e gasosos sem grandes modificações (Bizzo, 2003).

FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA CALDEIRA DE CONFIGURAÇÃO MISTA



FONTE: Adaptado de Togawa (2020).

Na representação esquemática mostrada na FIGURA 12, é possível observar o trajeto dos gases de combustão fluindo primeiramente na face externa dos tubos onde escorrem água internamente, até a seção flamotubular da caldeira, por dentro de tubos, envoltos por água, onde seguirá para a exaustão (Bizzo, 2003).

Para caldeiras de biomassa, a alimentação é feita utilizando esteiras, como pode ser observado na FIGURA 13. Este tipo de alimentação permite o uso do lodo flotado misturado ao cavado ou peletizado sem necessidade de alterações.

FIGURA 13 – ALIMENTAÇÃO DE CALDEIRAS



FONTE: LIPPEL (s. d.)

A eficiência energética é definida como a relação entre a quantidade de energia útil que um sistema consegue produzir e a quantidade total de energia que é consumida. Ou seja, ela mede o quão eficientemente um sistema transforma energia (química, elétrica, térmica, potencial) em trabalho (EPE, 2018).

Segundo o trabalho de Fagnani *et al.* (2019), quando adicionado 10% de lodo ao cavaco para queima na caldeira, houve diminuição da velocidade de rolamento da rosca de alimentação de combustível. A velocidade média da rosca de alimentação durante a queima do cavaco foi de 63 Hz e sua pressão média foi 7,73 kg f/cm<sup>2</sup>. Quando adicionado 10% de lodo ao cavaco, foi notado o aumento de

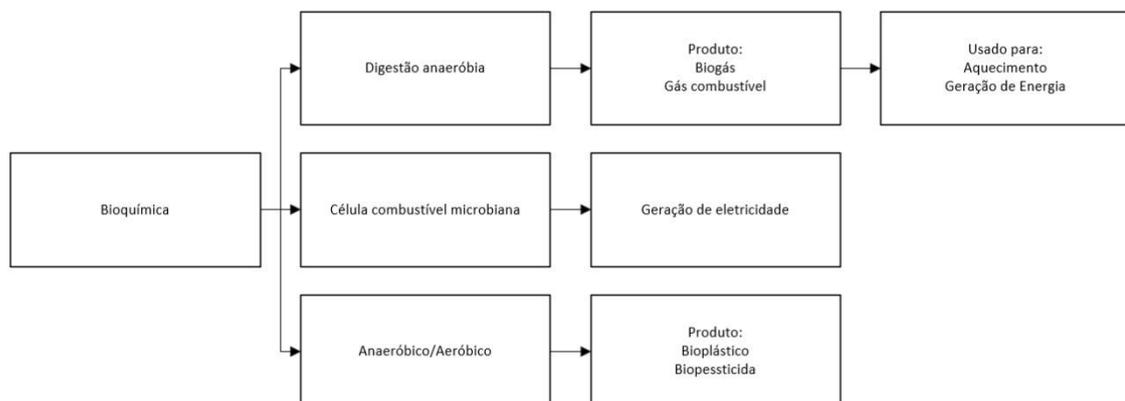
estabilidade da caldeira que ocasionou a parada da rosca de alimentação, pois a pressão atingiu o nível máximo de trabalho de 8 kg f/cm<sup>2</sup>. A velocidade da rosca de alimentação foi diminuída gradativamente, evitando o excesso de combustível na caldeira. A velocidade média da rosca de alimentação durante a queima do cavaco com 10% de lodo foi de 52,24 Hz, e a pressão média foi de 8,3 kg f/cm<sup>2</sup>. Com essa adição de lodo ao cavaco, foi observado um aumento no poder calorífico do combustível, aumentando a temperatura na fornalha e causando melhor troca térmica. Foi observado também que a pressão da caldeira se manteve mais estável e contribuiu para a redução da velocidade da rosca de alimentação, ou seja, contribuiu para um menor consumo de combustível.

Conforme a Resolução SEMA 016/14, para geração de calor ou energia utilizando subprodutos de madeira como combustível para caldeiras com potência térmica nominal inferior a 10 MW, é necessário avaliar CO e O<sub>2</sub> de referência (SEMA, 2014).

## 2.7 COMPARAÇÃO DE TECNOLOGIAS: COMBUSTÃO VS. OUTRAS ALTERNATIVAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA

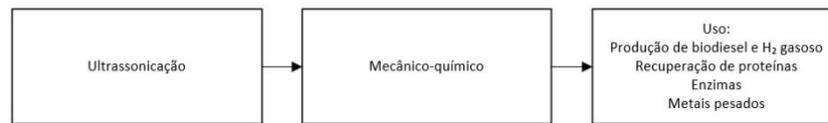
Além da queima direta, o lodo pode passar por processos como pirólise, gaseificação e biodigestão para produção de vetores energéticos rentáveis para a indústria. É possível dividir esses processos em rotas bioquímica, termoquímica e ultrassonicação. Na FIGURA 14, FIGURA 15 e FIGURA 16 são apresentadas as rotas e seus respectivos produtos.

FIGURA 14 – FLUXOGRAMA DA ROTA BIOQUÍMICA PARA O LODO FLOTADO



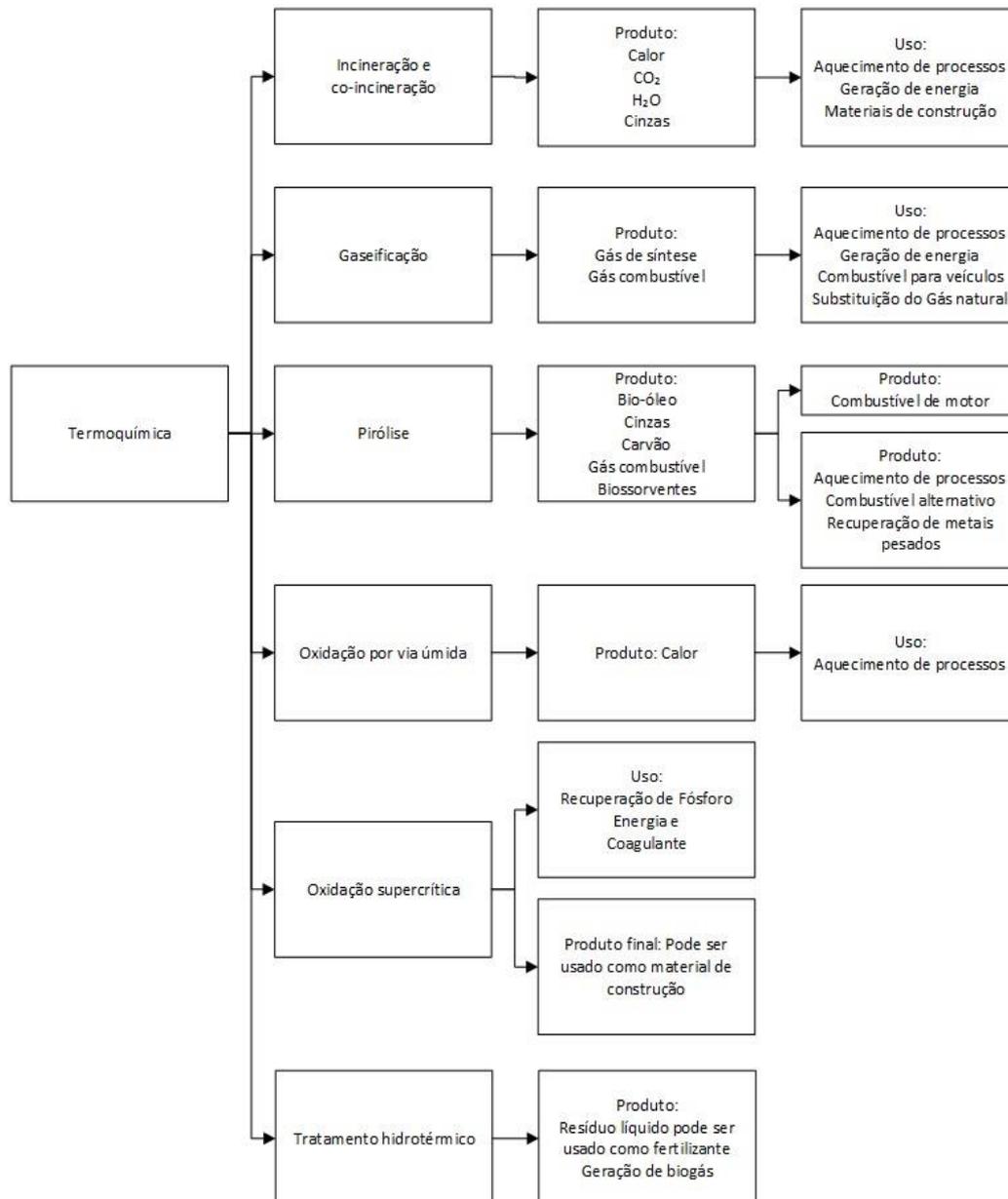
FONTE: Adaptado de Haghighat *et al.* (2020).

FIGURA 15 – FLUXOGRAMA DA ROTA DE ULTRASSONICAÇÃO PARA O LODO FLOTADO



FONTE: Adaptado de Haghighat *et al.* (2020).

FIGURA 16 – FLUXOGRAMAS DA ROTA TERMOQUÍMICA PARA O LODO FLOTADO



FONTE: Adaptado de Haghighat *et al.* (2020).

A pirólise é um processo de decomposição térmica de caráter endotérmico, ou seja, que absorve calor. Ela pode ser chamada também de destilação destrutiva. Na pirólise ocorre a quebra das ligações químicas das cadeias orgânicas pelo calor

e liberação de gases inflamáveis (Niessen, 1995). Além dos gases combustíveis, também pode ser produzido bio-óleo e biocarvão também chamado de *biochar*. Todos esses produtos têm valor energético e comercial (Neto, 2012; Pedroza *et al.*, 2010). Pela condição de velocidade de reação, há três tipos de pirólise: lenta, intermediária e rápida. Os produtos dessa reação dependem da taxa de aquecimento, da temperatura final e do tempo de reação (Schmitt *et al.*, 2019).

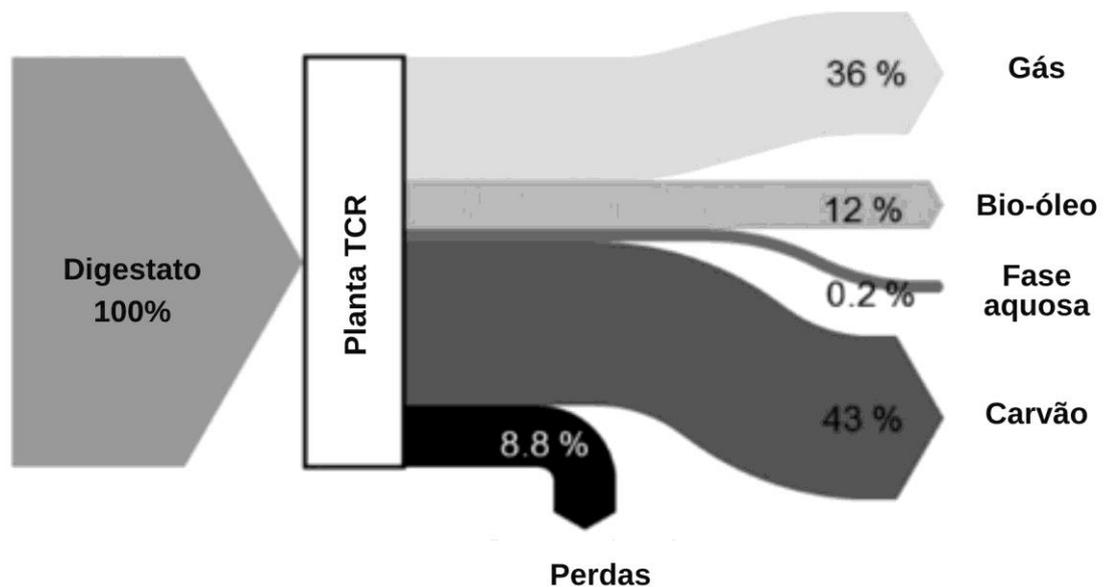
A gaseificação é um processo termoquímico no qual materiais orgânicos são convertidos em *syngas* (gás de síntese). O *syngas* é composto por CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>. Ele é uma fonte de combustíveis isentos de poluentes atmosféricos como óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), além de ser matéria-prima para produtos químicos como amônia (Wender, 1996). O processo de gaseificação ocorre em temperaturas elevadas e na presença de uma quantidade limitada de oxigênio, insuficiente para causar combustão completa.

A digestão anaeróbia é um processo de decomposição de matéria orgânica complexa (proteínas, lipídios e carboidratos) por microrganismos, como bactérias e archaeas, na ausência de oxigênio. O processo ocorre em quatro fases principais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Os produtos da digestão anaeróbia são o biogás, composto majoritariamente por CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> e o digestato que pode ser usado como fertilizante (Pagés-Díaz *et al.*, 2018).

A Reforma Termocatalítica (TCR®), é uma tecnologia avançada que transforma resíduos orgânicos em produtos de alto valor energético, como bio-óleo, *syngas* e biochar. O processo combina pirólise intermediária e reforma subsequente, maximizando a eficiência da conversão e minimizando os impactos ambientais (Schmitt *et al.*, 2019).

Na TCR®, o tempo de residência da biomassa é de até 10 minutos, e os gases deixam o reator após 2 a 10 segundos. O processo é aquecido por faixas de aquecimento externas para garantir o aumento contínuo das temperaturas durante o processo. Antes de cada experimento, a planta é purgada com nitrogênio para inércia, como é desejado em processos de pirólise. A pirólise intermediária opera a uma pressão padrão e a temperaturas de até 723 K. Imediatamente após sair do reator, os sólidos são transportados e armazenados no pós-reformador, enquanto os gases passam pelo leito de carvão. A temperatura mais promissora para a reforma está entre 773 e 1073 K (Schmitt *et al.*, 2019). Na FIGURA 17 é possível observar os produtos da TCR®.

FIGURA 17 – PRODUTOS DA REFORMA TERMOCATALÍTICA TCR®



Fonte: Adaptado de Neumann *et al.* (2015).

## 2.8 ASPECTOS ECONÔMICOS E REGULATÓRIOS

As políticas de gestão de resíduos da indústria de proteína animal no Brasil são regulamentadas principalmente pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela Lei nº 12.305/2010 (Brasil, 2010). Esta legislação visa a redução da geração de resíduos, incentivo à reciclagem e disposição ambientalmente adequada dos resíduos, inclusive os oriundos de processos industriais como abatedouros e frigoríficos (Brasil, 2010). Além disso, normas estaduais e federais, como a Resolução CONAMA nº 481/2017, também regulam o tratamento de efluentes e a gestão de resíduos sólidos orgânicos da indústria de proteína animal (CONAMA, 2017).

Como disposto anteriormente, a queima de um resíduo sólido deve atender à resolução da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA) de número 042/08, que limita a 20% do peso da mistura ou poder calorífico a quantidade máxima de um resíduo sólido em mistura com o combustível principal para queima em caldeira (SEMA, 2008).

O Brasil possui diversas formas de incentivo ao uso de resíduos sólidos para geração de energia. Uma delas é a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) -

Lei nº 12.305/2010 que em seu Art. 3º, inciso VII incentiva o aproveitamento energético de resíduos sólidos para reduzir a produção de lixo e promover sua destinação adequada (Brasil, 2010).

A Resolução de nº 482/2012 da ANEEL regulamenta a geração distribuída no Brasil que permite que indústrias e outros setores que produzem energia a partir de resíduos possam se conectar à rede elétrica e receber créditos pelo excedente de energia (ANEEL, 2012).

Também temos no Brasil, o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA). O PROINFA foi criado pelo governo brasileiro e incentiva a geração de energia a partir de fontes renováveis, incluindo biomassa, que pode ser gerada a partir de resíduos industriais (CCEE, 2024).

Além disso, empresas que utilizam resíduos para gerar energia podem se beneficiar dos créditos de carbono por reduzirem as emissões de gases de efeito estufa. Esse incentivo pode ser utilizado no mercado internacional, como parte do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do Protocolo de Kyoto (Sustainable Carbon, 2024).

Com a implementação de processos mais sustentáveis, a empresa se alinhará às metas de ESG (Ambiental, Social e Governança) e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), melhorando sua imagem no mercado, atraindo investimentos e garantindo o cumprimento das regulações ambientais.

Os ODS são um conjunto de 17 objetivos globais estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) como parte da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, adotada em 2015. Os ODS que as empresas podem atingir com a reutilização do lodo flotado para produção de energia são:

- ODS 7 - Energia Acessível e Limpa: Ao reutilizar o lodo flotado como combustível, a empresa promove o uso de fontes de energia alternativas e contribui para a geração de energia mais limpa e acessível, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis.
- ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura: Essa prática promove a inovação industrial e a eficiência ao transformar um resíduo industrial em combustível, melhorando a infraestrutura energética da empresa e incentivando a circularidade na produção.

- ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis: A reutilização do lodo flotado reduz o desperdício e promove a economia circular, um princípio central desse objetivo, ao transformar um resíduo em recurso.
- ODS 13 - Ação contra a Mudança Global do Clima: O uso de lodo como combustível, em vez de descartá-lo ou incinerá-lo, ajuda a reduzir emissões de gases de efeito estufa, diminuindo o impacto ambiental da empresa.
- ODS 15 - Vida Terrestre: Ao aproveitar o lodo em vez de descartá-lo em aterros, a empresa evita a contaminação de solos e lençóis freáticos, ajudando a preservar a vida terrestre e a qualidade ambiental ao redor.

Já as Metas ESG, do inglês *Environmental, Social, and Governance*, referem-se a objetivos relacionados às práticas de sustentabilidade ambiental, responsabilidade social e governança corporativa. Essas metas são estabelecidas por empresas, organizações ou instituições para medir e melhorar seu impacto nesses três pilares fundamentais: ambiental, social e governança.

No âmbito ambiental, a utilização do lodo flotado para geração de energia reduz o impacto ambiental da empresa ao evitar o descarte do lodo em aterros sanitários e a poluição que ele poderia gerar. Além disso, contribui para a eficiência energética ao substituir parcialmente fontes de energia convencionais por um recurso que seria descartado. No âmbito social, a reutilização de lodo mostra um compromisso com a responsabilidade social, pois a empresa busca minimizar seu impacto no ambiente e nas comunidades locais, promovendo uma produção mais sustentável.

Dependendo da implementação, pode também gerar novos postos de trabalho relacionados à gestão, tratamento e utilização de resíduos. No âmbito da governança, essa prática reflete uma boa governança ao adotar políticas que cumprem regulamentos ambientais e melhoram a imagem corporativa, reforçando o comprometimento com a sustentabilidade e as práticas responsáveis.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Uma pesquisa científica pode ser classificada quanto aos seguintes parâmetros: natureza, abordagem do problema, objetivos, procedimentos técnicos e tempo. Quanto à natureza, esta pesquisa é classificada como básica, pois seu objetivo é ampliar o conhecimento teórico acerca da aplicação do lodo flotado da indústria de proteína animal para geração de energia (Pereira *et al.*, 2018).

Quanto à abordagem do problema, temos uma abordagem qualitativa, uma vez que analisa textos e dados de estudos anteriores sobre o tema, focando na interpretação e compreensão do potencial energético do lodo flotado, em vez de utilizar métodos quantitativos ou experimentais. Quanto aos objetivos, o presente estudo tem caráter exploratório, pois busca investigar de maneira ampla o uso do lodo flotado para fins energéticos, com o objetivo de identificar potencialidades e desafios relacionados ao tema, e busca levantar novas questões e hipóteses que podem ser aprofundadas em estudos futuros (Pereira *et al.*, 2018).

Quanto aos procedimentos técnicos, esta pesquisa se caracteriza como revisão bibliográfica, pois analisa estudos anteriores sobre a composição do lodo, métodos de tratamento e aplicação energética, bem como as regulamentações ambientais, utilizando fontes como dissertações, artigos científicos e normas técnicas. Quanto ao tempo, o trabalho pode ser classificado como uma pesquisa de caráter transversal, já que a revisão bibliográfica considera uma visão panorâmica do tema em um determinado período de tempo, sem acompanhamento de longo prazo ou coleta de dados ao longo de diferentes períodos (Pereira *et al.*, 2018).

O levantamento bibliográfico da pesquisa foi realizado nas bases de dados acadêmicas *Google Scholar* e *ScienceDirect*, além de livros e sites especializados na área de engenharia, bioenergia e tratamento de resíduos. Foram incluídas dissertações, artigos científicos, livros e normas técnicas relevantes. Para seleção das fontes foi priorizado trabalhos que abordam aspectos técnicos.

Foram incluídos estudos que apresentaram análises detalhadas de parâmetros como poder calorífico do lodo e composição química; descreveram tecnologias utilizadas no tratamento e conversão energética do lodo flotado; discutiram regulamentações e impactos ambientais associados ao uso de resíduos para fins energéticos.

As informações extraídas das fontes selecionadas foram organizadas e analisadas de acordo com a composição química, potencial energético, processos de tratamento, impactos ambientais e viabilidade econômica. Ao total, foram analisados 128 trabalhos, incluindo livros, teses, dissertações, trabalhos de conclusão de curso e artigos científico. Desses, foram selecionados 32 para análise aprofundada e detalhamento neste trabalho.

Os principais resultados encontrados foram analisados com ênfase nas convergências e divergências entre os estudos analisados e nas implicações para o aprimoramento da eficiência energética. A análise também aponta para potenciais avanços na tecnologia de aproveitamento energético e suas contribuições para a sustentabilidade do setor.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 SÍNTESE DOS PRINCIPAIS ESTUDOS

O lodo flotado tem diversas aplicações para geração de energia. Ele pode ser misturado a um combustível sólido e queimado em caldeiras industriais, produzindo energia térmica. O lodo também pode ser submetido ao processo de biodigestão anaeróbia, tendo como produto principal o metano. É possível também realizar a pirólise, que é um processo de decomposição térmica. Na pirólise do lodo flotado temos como produtos: gases combustíveis, bio-óleo e biocarvão. Um processo muito similar à pirólise que também pode ser aplicado ao lodo é a gaseificação, a partir dela obtemos principalmente *syngas* (Shivaprasad *et al.*, 2024).

No trabalho de Fagnani *et al.* (2019) sobre alternativas para exploração energética do lodo flotado proveniente do tratamento de efluentes do abate de aves, eles dividiram o lodo em dois grupos: um produzido com coagulante orgânico e o outro com coagulante inorgânico. Eles constataram que o poder calorífico do lodo produzido com coagulante orgânico foi 32,16% maior do que o poder calorífico do cavaco, no entanto o custo para o tratamento desse lodo se mostrou 40% maior do que o tratado com coagulante inorgânico.

No trabalho de Mantovan *et al.* (2022) sobre co-combustão de lodo flotado de tratamento de efluentes de abatedouro com cavaco de eucalipto em uma unidade geradora de vapor, foi constatado que aumentando a proporção de lodo misturado ao cavaco, houve o aumento da eficiência da unidade geradora de vapor. Isso ocorreu devido à baixa concentração de O<sub>2</sub> e CO nos gases de combustão. A eficiência foi maior na proporção de 20% de lodo em comparação aos testes com 10, 5 e 0%.

Já Sena *et al.* (2007) em seu estudo de caso sobre a aplicação de biocombustível da biomassa obtida de uma estação de tratamento de efluentes da indústria de carnes através do processo de flotação, analisaram o lodo produzido do tratamento de efluentes da indústria de carnes como biocombustível. Foi constatado que os lodos produzidos com coagulantes de sais férricos alcançaram maiores eficiências. O biocombustível apresentou alto poder calorífico inferior (PCI) e altos teores de C, N e O, o que indica ser um combustível eficiente. No entanto, o

biocombustível apresentou elevado teor de umidade, sendo assim, é necessário a secagem antes do uso.

Juppa *et al.* (2024), em seu trabalho sobre pellets produzidos a partir da biomassa de capim elefante BRS Kurumi, lodo flotado e bagaço de mandioca, constataram que a adição de lodo ao capim BRS Kurumi proporcionou redução no teor de cinzas 14,66% para 7,28%, essa diminuição contribui positivamente para o poder calorífico e prevenção de corrosão em queimadores. As amostras de pellets com adição de 20% de lodo flotado apresentaram o menor teor de cinzas e umidade, e elevado teor de carbono fixo que conseqüentemente aumentou o poder calorífico dos pellets produzidos.

Bashir *et al.* (2022) em seu trabalho sobre combustível de aviação sustentável a partir do lodo de esgoto, constataram que é possível converter com sucesso o lodo em hidrocarbonetos de faixa de combustível de aviação sustentável (C<sub>8</sub>-C<sub>16</sub>) através do processo de Reforma Termo-Catalítica (2 kg/h) a 450°C de pirólise e 700°C de temperatura de pós-reformação para produzir um bio-óleo cru. O bio-óleo foi tratado e aprimorado por meio de um hidroprocessamento em duas etapas, que incluiu hidroxigenação e hidrocracking, realizados em um reator de alta pressão. Durante o processo, a pressão de hidrogênio variou, enquanto temperatura, volume de alimentação, carga de catalisador e tempo de batelada foram mantidos constantes. Com isso, cerca de 25% em peso de combustível de aviação, com parafinas e aromáticos na faixa C<sub>8</sub>-C<sub>16</sub>, foi recuperado a 60 bar de H<sub>2</sub>.

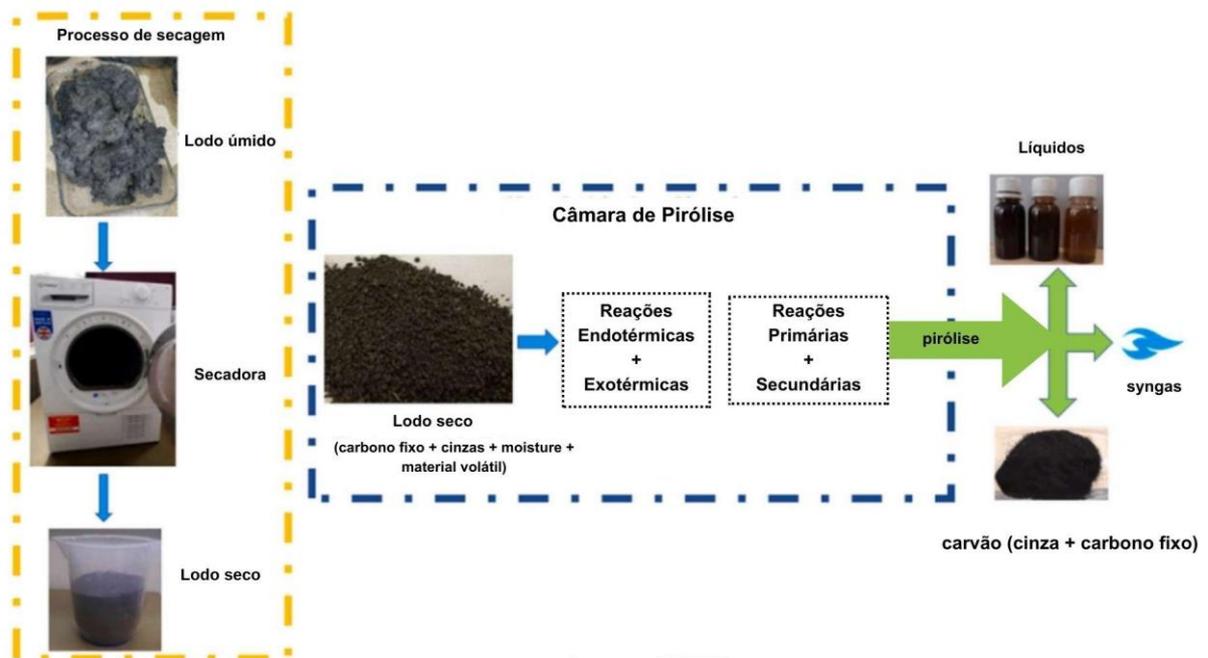
Esse combustível, derivado de lodo de esgoto atendeu à maioria das especificações do padrão ASTM D7566 (ASTM, 2022) quanto ao valor calorífico, viscosidade, densidade e ponto de congelamento, embora alguns parâmetros como fumaça, ponto de fulgor e acidez, tenham ficado levemente fora dos padrões. O processo também gerou nafta verde e diesel como subprodutos.

Marazza *et al.* (2019) em seu trabalho sobre redução de gases de efeito estufa e balanço energético do lodo de esgoto tratado através de pirólise combinada com reforma, constataram que o lodo tem potencial para se tornar uma fonte de energia renovável através da pirólise seguida de reforma, utilizando o biocarvão como catalisador. Verificou-se também que é possível gerar 2 MJ por kg de lodo seco, livre de cinzas, por meio do processamento direto do lodo, sem a necessidade de uma etapa intermediária de digestão anaeróbia, utilizando produtos TCR® para fornecer calor e energia ao sistema. Essa configuração de processamento contribui

para a redução de emissões de gases de efeito estufa. Esta tecnologia pode ser aplicada à diferentes tipos de biomassa, incluindo diferentes tipos de lodo.

Shivaprasad *et al.* (2024) em seu trabalho sobre a produção de *syngas* rico em hidrogênio a partir da pirólise do lodo constataram que através de secagem e pirólise foi possível produzir *syngas* com poder calorífico inferior de 18,36 MJ/m<sup>3</sup>. No trabalho foi enfatizado a importância da secagem. Imagens do lodo úmido, secadora e lodo seco assim como um fluxograma do processo são mostrados na FIGURA 18.

FIGURA 18 – IMAGENS DO LODO ÚMIDO E SECO E FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO SYNGAS



FONTE: Adaptado de Shivaprasad *et al.* (2024).

Restrepo *et al.* (2022), em seu trabalho sobre adição de suco de cana-de-açúcar ao lodo flotado de abate de aves para melhorar a digestão anaeróbica para produção de metano, foi constatado que a adição de 2% de suco de cana-de-açúcar promoveu os maiores valores de produção de biogás, rendimento de metano e produtividade de metano. Neste estudo a co-digestão mostrou-se uma alternativa promissora para o tratamento biológico, viabilizando a recuperação energética e agrônômica dos substratos.

No trabalho de Salehiyoun *et al.* (2020), sobre co-digestão anaeróbica de lodo de esgoto e resíduos de abatedouro em biodigestores, foi verificado que a co-

digestão o lodo de esgoto com lodo de abate de animais aumentou a geração de biogás quando comparado somente a digestão do lodo de esgoto.

Agabo-García, Solera e Perez (2022), em seu trabalho sobre co-digestão de resíduos de abatedouro em reator anaeróbio de batelada sequencial, constataram que com o pré-tratamento do lodo e a mistura em uma proporção adequada com a água residuária de abatedouro, é possível alcançar uma carga orgânica e população microbiana ideais, melhorando a produção de biometano na co-digestão anaeróbia de resíduos de abatedouro em sistemas AnSBR durante operação estável (HRT 15–8d). Nessas condições, os AnSBR têm o potencial de gerar uma quantidade significativa de energia, cobriria parte da demanda anual de energia da agroindústria.

No trabalho de Latifi, Karrabi e Danesh (2019), sobre co-digestão anaeróbia de efluentes de abatedouro de aves com lodo de esgoto em bio-reatores em batelada, foi constatado que a adição de lodo ativado de estações de tratamento do próprio abatedouro pode ser usada como um inóculo secundário na co-digestão anaeróbia de resíduos do abate de aves. Os resultados indicaram que o aumento do teor de sólidos totais e a diminuição do índice de substrato para inóculo provocaram um acúmulo de ácidos graxos e elevadas concentrações de amônia no reator, o que reduziu os rendimentos de metano. Na primeira fase com reatores de 1L, os maiores rendimentos de biogás e metano foram, respectivamente, 0,631 e 0,462 m<sup>3</sup>/kg-VS<sub>added</sub>, alcançados com 73% de teor de metano e 66% de remoção de sólidos voláteis. Na segunda fase, na qual o processo de co-digestão foi estudado em maior escala com reator de 20L, os rendimentos de biogás e metano foram de 0,574 e 0,402 m<sup>3</sup> por kg de biomassa adicionada, com 70% de teor de metano e 63% de remoção de sólidos voláteis em um tempo de retenção de 42 dias.

No trabalho de Park *et al.* (2017), sobre o efeito do pré-tratamento hidrotérmico no lodo de resíduos de abatedouro de aves para a melhoria da solubilização, das propriedades físicas e da produção de biogás através da digestão anaeróbia, foi constatado que o pré-tratamento hidrotérmico aumenta a demanda química de oxigênio solúvel, sólidos voláteis e solubilização de demanda química de oxigênio (28–38%). Os resultados de tempo de sucção capilar, o tempo de filtração e o tamanho das partículas indicam que a estrutura física do lodo foi alterada pelo pré-tratamento. A produção de metano aumentou com o pré-tratamento térmico até 190 °C em comparação ao lodo não tratado. Portanto, foi concluído que a temperatura

ideal de operação para o pré-tratamento hidrotérmico de resíduo de abatedouro de aves foi de 190 °C.

Cheng *et al.* (2024) em seu trabalho sobre produção de gás rico em H<sub>2</sub> a partir da gaseificação de lodo por meio de tecnologia de água supercrítica, constataram que a gaseificação com água supercrítica do lodo foi um método eficaz para obtenção de gás rico em H<sub>2</sub>. Foi utilizado o design de Box-Behnken para avaliar o impacto de variáveis operacionais como temperatura (400–600 °C), concentração de alimentação (entre 5 e 25% em peso), tempo de residência (15–45 min) e proporções de massa de catalisador para alimentação (0–0,50). A produção máxima de H<sub>2</sub>, de 3,22 mmol/g de biomassa, foi alcançada sob condições ótimas de 600 °C, 32,76 min, com KOH a massa de catalisador para alimentação de 0,45 e K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> a massa de catalisador para alimentação de 0,28.

No trabalho de Gabrieli *et al.* (2022), sobre análise numérica da produção de biometano a partir da gaseificação oxi-vapor de lodo de biomassa e esgoto e do processo de metanação, foi criado um modelo de planta completa no código comercial Aspen plus, que foi validado com resultados experimentais obtidos com um gaseificador em escala real, que foi alimentado com lodo de esgoto e cavaco de madeira. A porcentagem de lodo em massa não ultrapassou 30% e não foram registrados nenhum bloqueio do reator ou problemas de descarga de cinzas durante a atividade experimental. Os resultados da análise numérica indicaram que o processo de co-gaseificação oxi-vapor apresentou uma eficiência elevada de conversão de energia, alcançando cerca de 80%, enquanto o rendimento de metano produzido corresponde aproximadamente a 20% em massa da matéria-prima utilizada. No entanto, o consumo de água foi superior a 1,0 kg/kg de metano, e a demanda de eletricidade foi em torno de 0,70 kWh/kg de metano, representando questões críticas para a produção de metano. Para reduzir o consumo de água em todo o processo, o trabalho sugere a análise das características da abordagem de oxi-gaseificação e metanação usando CO<sub>2</sub> em vez de vapor. A possibilidade de reciclar o CO<sub>2</sub> da planta de metanação para o gaseificador poderia evidentemente reduzir o consumo de energia térmica para a produção de vapor.

Migliaccio *et al.* (2021), em seu trabalho de investigação experimental e modelagem de gaseificação de lodo de esgoto em leito fluidizado, constataram que valores mais altos da razão de equivalência oxigênio/combustível levaram a melhores desempenhos de gaseificação em termos de menor geração de alcatrão,

que é conhecido por causar incrustações e obstruções em tubulações e motores. No entanto, essas condições produzem um gás de síntese de menor qualidade, constatado pela diminuição da razão  $H_2/CO$  e pelo aumento da razão  $CO_2/CO$ .

No trabalho de Klumb e Sainz (2018) sobre caracterização de lodo ativado e lodo físico-químico de estação de tratamento de efluentes de indústrias de arroz parboilizado e de laticínios para geração de energia térmica, foi estimado o poder calorífico superior e inferior de amostras de lodo de estação de tratamento de efluentes de laticínio e arroz parboilizado. Para o lodo do laticínio, os valores de PCI e PCS foram 22,6 e 23,6 (MJ/kg) respectivamente, já para as duas amostras de lodo de arroz parboilizado, os valores de PCI foram 10,8 e 6,8 (MJ/kg) e de PCS foram 11,2 e 7,1 (MJ/kg).

Kokalj, Arbiter e Samec (2017), em seu trabalho sobre a gaseificação de lodo de esgoto como alternativa para armazenamento de energia, constataram que a utilização de energia do lodo de esgoto por meio da gaseificação por plasma pode representar uma forma alternativa de armazenamento de energia. Concluíram que a melhor condição para gerar gás de síntese apto para inserção em uma rede de distribuição de gás natural seria gaseificar o lodo de esgoto com umidade entre 35–40%. Já para valorização do gás de síntese no próprio local, visando maior eficiência, o lodo deve ser seco até alcançar 20% de umidade.

No trabalho de Nipattummakul *et al.* (2010), sobre a produção de hidrogênio e *syngas* a partir da gaseificação a vapor do lodo de esgoto, eles realizaram a gaseificação de amostras de lodo de esgoto usando vapor em alta temperatura como agente gaseificante em temperaturas de reator de 700, 800, 900 e 1000 °C. O rendimento de hidrogênio aumentou com o aumento da temperatura do reator e lodo de esgoto produziu mais hidrogênio do que comparado ao papel e a resíduos alimentares nas mesmas condições de gaseificação. Além disso, a gaseificação do lodo de esgoto a vapor gerou aproximadamente três vezes mais hidrogênio do que a gaseificação com ar.

No trabalho de Bashir *et al.* (2022), sobre a produção de combustível de aviação sustentável a partir de lodo de esgoto, foi produzido syncrude a partir de lodo sanitário, utilizando o sistema TCR (Reforma Termo-catalítica) e foi aprimorado com sucesso para combustível de aviação sustentável. O combustível para aviação produzido atendeu às especificações da norma ASTM D7566 (ASTM, 2022).

No trabalho de Garcia (2016), sobre o uso do lodo de flotador de abatedouro de aves na produção de *biochar*, foi constatado a capacidade de produção de *biochar* a 350 °C por uma hora, com rendimento de 38,12%. Foi verificado que o *biochar* produzido possui características similares ao *biochar* proveniente de outras matérias-primas.

No trabalho de Konrad *et al.* (2010), sobre a avaliação da produção de biogás e geração de metano a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes e glicerina residual, constataram que a produção de biogás na amostra cuja adição de glicerina foi de 3%, apresentou um aumento de 81,4% com relação à amostra controle. Na amostra com adição de 6% de glicerina, o acréscimo na geração de biogás foi de 59,2%, em comparação à amostra controle. A porcentagem de metano verificada nos experimentos foi de 72% na amostra com adição de 3% de glicerina, no entanto os índices de metano caíram cerca de 10% na amostra com adição de 6% de glicerina.

#### 4.2 EFICIÊNCIA E IMPACTOS DO USO DO LODO COMO COMBUSTÍVEL

Fagnani *et al.* (2019), em seu trabalho sobre uma alternativa para o aproveitamento energético do lodo gerado no tratamento físico-químico de efluentes do abate e processamento de aves nas indústrias brasileiras, constataram que a queima do lodo como combustível na própria indústria reduz risco de impactos ambientais causados pelo transporte ou armazenamento inadequado. Ademais, constataram que o uso do lodo dentro desta agroindústria que abate 500 mil aves/dia proporcionará um ganho mensal de \$15.000.

No trabalho de Teixeira (2023), sobre análise de cenários para a queima conjunta de lodo industrial e cavaco de eucalipto para geração de vapor de processo em abatedouro de aves, foi constatado uma economia de 15% no cavaco para queima em caldeira quando utilizado lodo flotado com umidade de 65% produzido na própria indústria. Essa economia é significativa, sendo que a indústria em questão utiliza cerca de 170 toneladas de cavaco ao dia e a tonelada do cavaco pode chegar a R\$270,00.

No trabalho de Giroto *et al.* (2018), sobre uso de lodos de efluentes industriais para queima em caldeira como biomassa na geração de energia e redução de custos com a destinação dos resíduos, foi constatado uma redução de

17,6% no uso no consumo de combustível quando associado 15% de lodo à lenha para queima em caldeira. A economia calculada foi de aproximadamente R\$7,57 por tonelada de vapor gerado, além do ganho com a redução da disposição do lodo para aterro, que baseado em uma indústria que abate 10.000 aves/hora é de R\$52.560,00.

Agabo-García, Solera e Perez (2022), em seu trabalho sobre reator anaeróbio em batelada sequencial para co-digestão de resíduos de matadouros (águas residuais e lodo ativado), foi constatado que co-digestão de águas residuais de abatedouros e lodo pode alcançar altos rendimentos em processos de digestão anaeróbia, utilizando um tempo de retenção hidráulica dentro da faixa estudada de 6 à 15 dias, no qual o tempo de retenção hidráulica ideal seria entre 8 e 10 dias e o tempo de ciclo ideal seria de 48 horas. O estudo foi feito considerando instalações que produzam 4 m<sup>3</sup>/dia de lodo para co-geração de metano. De acordo com as condições adotadas e para os rendimentos máximos obtidos no estudo, a produção anual de metano seria  $2,69 \cdot 10^5$  m<sup>3</sup>.

No trabalho de Chan et al. (2023), sobre avanços no co-processamento termoquímico de biomassa e lodo para energia sustentável, produtos de valor agregado e economia circular, constataram que substituir combustíveis fósseis por biomassa e lodo residual, reduz as emissões de gases de efeito estufa e mitiga os impactos negativos do consumo de combustíveis fósseis, pois as emissões líquidas de dióxido de carbono provenientes da co-combustão de biomassa e lodo residual são próximas a zero, podendo reduzir as emissões de dióxido de carbono em 80% se comparado com combustíveis fósseis. No ponto de vista econômico, a co-combustão de biomassa e lodo oferece uma solução viável para geração de energia, contribuindo para a economia circular.

Gondim (2017), em seu trabalho sobre o potencial de geração de energia a partir dos resíduos sólidos orgânicos e efluentes líquidos gerados em uma unidade agroindustrial, foi constatado que o resíduo orgânico de maior volume foi o lodo flotado. O potencial de geração térmica foi de 12.912.255 MJ/mês, considerando uma caldeira de baixo rendimento no sistema de cogeração.

#### 4.3 DESAFIOS E PERSPECTIVAS PARA MELHORIAS E SUSTENTABILIDADE

Uma dificuldade no uso do lodo para queima em caldeiras está relacionada à formação de incrustações. Essas incrustações afetam diretamente a eficiência energética do sistema, interferindo na transferência de calor. Isso exige que o sistema de aquecimento trabalhe mais para produzir vapor, acarretando maior consumo de combustível (Zarpelon e Azzolini, 2015). A propensão de um combustível à formação de incrustações é medida pelo índice de incrustação. Pronobis (2005) afirma que quanto maior o índice, mais propenso é o combustível a formar incrustações. Nesse contexto, Mantovan (2022) avaliou lodos provenientes de estações de tratamento de efluentes e constatou que esses lodos apresentam maior tendência à formação de incrustações do que o cavaco de eucalipto.

Outro desafio para o uso do lodo flotado ocorre em processos de gaseificação ou pirólise do lodo, pois pode haver formação de alcatrão, que causa problemas significativos como entupimento de linhas e filtros, formação de coque, etc. (Han e Kim, 2008). Além disso, o alcatrão é também prejudicial à saúde humana, pois contém diversos compostos cancerígenos e teratogênicos. Ele ainda contém uma quantidade considerável de energia que pode ser utilizada para a produção de gás. Portanto, a geração de alcatrão, seja na gaseificação ou pirólise, também reduzirá a eficiência energética do processo (Hu *et al.*, 2021).

Na digestão anaeróbia, há alguns aspectos que devem ser considerados, como por exemplo a baixa produção de biogás causado pelo acúmulo de ácidos graxos decorrente no alta quantidade de proteína, e o baixo percentual de metano no biogás, a possibilidade de vazamentos de biogás que podem influenciar o entorno e a necessidade de manutenção periódica (Ayub *et al.*, 2022; Latifi; Karrabi; Danesh, 2019; Muktadir; Ren; Zhou, 2023).

Na pirólise do lodo uma das dificuldades é que é necessário um alto investimento de capital, além de gerar emissões gasosas que afetam o clima. Outra preocupação é com a segurança dos operadores, pois o processo ocorre em altas temperaturas (Ayub *et al.*, 2022; Rossi *et al.*, 2023).

Perspectivas futuras incluem o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, como digestão anaeróbia aprimorada, gaseificação e pirólise, bem como o uso de pré-tratamentos para melhorar o rendimento energético (Muktadir; Ren; Zhou, 2023). Além disso, estratégias integradas de economia circular, como o

reaproveitamento de nutrientes e a redução de emissões de gases de efeito estufa, podem fortalecer a sustentabilidade desse processo. A implementação de políticas públicas e incentivos para inovação tecnológica também será crucial para maximizar os benefícios ambientais e econômicos do uso do lodo flotado como fonte de energia (Gurunani *et al.*, 2022).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi apresentado uma síntese sobre as tecnologias utilizadas para recuperação energética do lodo flotado proveniente de efluente da indústria de proteína animal, com destaque para combustão do lodo junto à outra biomassa, pirólise, gaseificação, digestão anaeróbia e reforma termocatalítica.

Este estudo, ao reunir e analisar dados da literatura, demonstrou que o lodo possui características químicas e energéticas que o tornam um recurso viável, como PC, desde que submetido a tratamentos adequados, como a secagem e a mistura com outras biomassas. Além disso, a valorização deste resíduo reflete o potencial da economia circular no setor agroindustrial, ao transformar um passivo ambiental em ativo energético.

A revisão bibliográfica mostrou que o lodo flotado tem alto teor de carbono e poder calorífico significativo, sendo adequado para processos como combustão, pirólise, gaseificação e biodigestão anaeróbia. No entanto, ainda há desafios, como a alta umidade do material e o potencial de formação de incrustações em caldeiras. Para solucionar esses problemas, são necessárias tecnologias de pré-tratamento eficientes e estudos adicionais para otimizar a aplicação em larga escala.

Outro ponto que foi destacado é a importância dos coagulantes utilizados no tratamento dos efluentes, que influenciam diretamente as características do lodo flotado. Os coagulantes orgânicos, embora mais caros, demonstraram melhores propriedades energéticas e menor impacto ambiental em comparação aos inorgânicos.

Além dos aspectos técnicos, a análise também reforçou os benefícios da utilização do lodo flotado como fonte energética. A substituição parcial de combustíveis fósseis contribui para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa e para o cumprimento de metas ambientais, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Assim, essa estratégia não apenas atende às demandas regulatórias, mas também fortalece o compromisso da indústria com práticas mais sustentáveis.

Em síntese, o reaproveitamento do lodo flotado é uma alternativa que combina benefícios ambientais, econômicos e sociais, alinhando-se às tendências globais de transição energética e economia circular. No entanto, para que seu potencial seja plenamente explorado, é fundamental a realização de estudos

experimentais mais detalhados e a implementação de políticas públicas que incentivem o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para o setor.

## 5.1 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como sugestão de trabalhos futuros, pode ser destacado:

1. Estudo dos efeitos da gaseificação e pirólise do lodo flotado para aumento da capacidade calorífica para combustão;
2. Para a combustão do lodo flotado com outra biomassa: investigar as emissões de CO, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> provenientes da queima do lodo em diferentes proporções;
3. Análise de viabilidade econômica de implantação de uma planta de biodigestão anaeróbia na própria agroindústria para gerar eletricidade para consumo ou venda para a rede;
4. Estudo da tecnologia de reforma termocatalítica (TCR®) para obtenção de vetores energéticos a partir do lodo flotado de indústria de proteína animal.

## REFERÊNCIAS

ABPA – Associação Brasileira de Proteína Animal. **Relatório Anual 2024**. Disponível em: <[https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2024/04/ABPA-Relatorio-Anual-2024\\_capa\\_frango.pdf](https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2024/04/ABPA-Relatorio-Anual-2024_capa_frango.pdf)>. Acesso em: 17 set. 2024.

AGABO-GARCÍA, C.; SOLERA, R.; PEREZ, M. Anaerobic sequential batch reactor for CO-DIGESTION of slaughterhouse residues: wastewater and activated sludge. **Energy**, Cadiz, v. 255, p. 124575, 2022.

ANDRIOLA, M. P. **Pellets produzidos a partir da mistura do capim elefante BRS Capiacu e lodo flotado**. 2023. 71 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Programa de Pós-Graduação em Bioenergia. Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2023.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Brasília: Diário Oficial da União, 2 fev. 2015.

ARCILA, H. R.; PERALTA, J. J. Agentes naturales como alternativa para el tratamiento del agua. **Revista Facultad de Ciencias Básicas**, v. 11, n. 2, p. 136-153, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR8289**: Carvão mineral – Determinação do teor de cinzas – Método de ensaio (Versão corrigida 1987). Rio de Janeiro: 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR8290**: Carvão mineral – Determinação do teor de materiais voláteis – Método de ensaio. Rio de Janeiro: 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR8293**: Carvão mineral – Determinação da umidade – Método de ensaio. Rio de Janeiro: 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR8299**: Carvão mineral – Determinação do carbono fixo – Método de ensaio. Rio de Janeiro: 1983.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **ASTM D7566–22**: Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, 2022.

AZEVEDO, A.; LAPA, N.; MOLDÃO, M.; DUARTE, E. Opportunities and challenges in the anaerobic co-digestion of municipal sewage sludge and fruit and vegetable wastes: A review. **Energy Nexus**, v. 10, p. 100202, 2023.

AZIZ, A.; BASHEER, F.; SENGAR, A.; IRFANULLAH, S. U.; KHAN, I. H. F. Biological wastewater treatment (anaerobic-aerobic) technologies for safe discharge of treated slaughterhouse and meat processing wastewater. **Science of the Total Environment**, v. 686, p. 681-708, 2019.

AZZOLINI, J. C.; FABRO, L. F. Monitoramento da eficiência do sistema de tratamento de efluentes de um laticínio da região meio-oeste de Santa Catarina. **Unoesc & Ciência**, Joaçaba, v. 4, n. 1, p. 43-60, 2013.

AYUB, Y.; MEHMOOD, A.; REN, J.; LEE, C. K. M. Sustainable recycling of poultry litter to value-added products in developing countries of South Asia. **Journal Of Cleaner Production**, Hong Kong, v. 357, p. 132029, 2022.

BAE, Y. H.; KIM, H.-J.; LEE, E.-J.; SUNG, N.-C.; LEE, S.-S.; KIM, Y.-H. Potable water treatment by polyacrylamide base flocculants, coupled with an inorganic coagulant. **Environmental Engineering Research**, v. 12, n. 1, p. 21-29, 2007.

BASHIR, M. A. *et al.* A step change towards sustainable aviation fuel from sewage sludge. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**, v. 163, 2022.

BASSIN, J. P; DEZOTTI, M. Tratamento primário, secundário e terciário de efluentes. *In:* DEZOTTI, M. *et al.* **Processos e Técnicas para o Controle Ambiental de Efluentes Líquidos**. Rio de Janeiro: E-papers, 2008, cap. 3, p. 56-198.

BASU, P. **Biomass Gratification, Pyrolysis and Torrefaction**. 3. ed. Canadá: Academic Press, 2018. 582 p.

BAZZO, E. **Geração de Vapor**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 1995. 216 p.

BIZZO, A. W. **Geração, Distribuição e Utilização de Vapor, Apostila de curso**, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, p.18, 68-73, 2003.

BOCCHI, R. **Otimização do sistema de tratamento composto por reator eletroquímico seguido por flotação por ar dissolvido: Aplicação em efluente de frigorífico e matadouro de suínos**. 2022. 88 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Campus Medianeira, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2022.

BORGES, A. C. P. **Caracterização energética do cavaco de Eucalyptus grandis “in natura” e torrefeito**. 2015. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Programa de Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015.

BOTARI, A.; BOTARI, J. C. GREATTI, G. **Análise da eficiência da coagulação e da floculação em estações de tratamento de água em ciclo completo no Brasil**. *In:* XIV International Conference on Engineering and Technology Education, 2017, Salvador.

BOTELHO, M. H. C.; BIFFANO, H. M. **Operação de caldeiras: gerenciamento, controle e manutenção**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm). Acesso em: 15 out. 2024.

BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Projeções do agronegócio 2021/2022 a 2031/2032. Brasília: SPA, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-2021-2022-a-2031-2032-1>>. Acesso em: 17 set. 2024.

BRASIL, A. C. de M.; GHESTI, G. F.; RODRIGUES, J. P.L GUIMARÃES, M. G.; EVARISTO, R. B. W. **Caracterização e aplicação de biomassa em tecnologias de conversão termoquímica**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 2021. 116 p.

BREF. **Best available techniques**: Reference Document for the Slaughterhouses, Animal Byproducts and Edible Co-products Industries. 2021. Disponível em: <<https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2021-06/SA-BREF-20210629.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2024.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. **Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca**. IPEF, Piracicaba, n. 16, p. 63-70, 1978.

BUSTILLO-LECOMPTE, C. F.; MEHRVAR, M. Treatment of actual slaughterhouse wastewater by combined anaerobic–aerobic processes for biogas generation and removal of organics and nutrients: An optimization study towards a cleaner production in the meat processing industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 278–289, 2017.

BUSTILLO-LECOMPTE, C. F.; MEHRVAR, M. Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: a review on trends and advances. **Journal of Environmental Management**, v. 161, p. 287–302, 2015.

CAMARGO, B. S.; BRAGHNINI JÚNIOR, A.; CAMARGO, S. K. de C.; CARASCHI, J. C.; ARAÚJO, C. K. de C. Análise de pellets de madeira produzidos a partir de diferentes composições. *In*: CONBREPPO, 7., 2017, Ponta Grossa. **Anais [...]**. Ponta Grossa: APREPRO, 2017.

CCEE. **Proinfra**. 2024. Disponível em: <<https://www.ccee.org.br/mercado/proinfra>>. Acesso em: 15 out. 2024.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A.; KANOGLU, M. Chemical Reactions. In: **Thermodynamics: an engineering approach**. 9th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019. p. 747-790.

CENTRAL ANALÍTICA (C.A.) – **Análise Elementar – CHN**. São Paulo: Central Analítica IQ - USP, s.d. Disponível em: <[https://ca2.iq.usp.br/paginas\\_view91ab.html?idPagina=7#:~:text=A%20An%C3%A1lise%20elementar%20%C3%A9%20uma,combust%C3%A3o%20s%C3%A3o%20quartificados%20em%20um](https://ca2.iq.usp.br/paginas_view91ab.html?idPagina=7#:~:text=A%20An%C3%A1lise%20elementar%20%C3%A9%20uma,combust%C3%A3o%20s%C3%A3o%20quartificados%20em%20um)>. Acesso em: 15 out. 2024.

CHAN, Y. J.; CHONG, M. F.; LAW, C. L.; HASSEL, D. G. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. **Chemical Engineering Journal**, Malaysia, v. 155, n. 1-2, p. 1-18, 2009.

CHAN, Y. H.; LOCK, S. S. M.; CHIN, B. L. F.; WONG, M. K.; LOY, A. C. M.; FOONG, S. Y.; YIIN, C. L.; LAM, S. S. Progress in thermochemical co-processing of biomass and sludge for sustainable energy, value-added products and circular economy. **Bioresource Technology**, Malaysia, v. 380, p. 129061, 2023.

CHENG, J. *et al.* H<sub>2</sub>-rich gas production from gasification of oily sludge via supercritical water technology: synergy effect of koh, k<sub>2</sub>co<sub>3</sub>, and reaction parameters. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 205, 2024.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA). **Pecuária Cepea**: produção brasileira de carne bovina bate recorde em 2023. Disponível em: <<https://cepea.esalq.usp.br/br/releases/pecuaria-cepea-producao-brasileira-de-carne-bovina-bate-recorde-em-2023.aspx>> Acesso em: 17 set. 2024. CNA – Confederação de Agricultura e Pecuária do Brasil. PIB do agronegócio cresce no segundo trimestre e acumula alta de 0,5% em 2023. CNA, 28 set. 2023.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 382, de 26 de dezembro de 2006**. Dispõe sobre novos limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Seção 1, p. 141-146, 2 jan. 2007.

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução nº 481, de 3 de outubro de 2017**. Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, Fev. 2011. Disponível em: < [https://conama.mma.gov.br/images/conteudo/RelCONAMA\\_2017.pdf](https://conama.mma.gov.br/images/conteudo/RelCONAMA_2017.pdf) >. Acesso em: 21 out. 2024.

CORAL, L. A.; BERGAMASCO, R.; BASSETTI, F. J. Estudo da Viabilidade de Utilização do Polímero Natural (TANFLOC) em Substituição ao Sulfato de Alumínio no Tratamento de Águas para Consumo. In: International Workshop – Advances in Cleaner Production, 2., 2009, São Paulo. **Key Elements For A Sustainable World: Energy, Water and Climate Change**, São Paulo, 2009.

CORREIA, M. A. C.; SEYE, O.; SILVA, A. M. P. da; SILVA, R. L. da. Características e potencial energético do bagaço da cana-de-açúcar armazenado sem cobertura por um período prolongado. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 13, n. 1, p. 173-187, 2020.

CRNKOVIC, P. M.; POLITO, W. L.; DA SILVA FILHO, C. G.; MILIOLI, F. E.; PAGLIUSO, J. D. O efeito da granulometria na decrepitação durante a decomposição térmica de calcários e carvão. **Química Nova**, São Paulo, v. 27, n. 1, p. 58-61, 2004.

DEBONI, T. L.; SIMIONI, F. J.; BRAND, M. A.; COSTA, V. J. Models for estimating the price of forest biomass used as an energy source: a brazilian case. **Energy Policy**, Santa Catarina, v. 127, p. 382-391, 2019.

EMBRAPA. **Manual para gestão de água e de resíduos do processamento de peixes**. Brasília: Embrapa, 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1127919/manual-para-gestao-da-agua-e-de-residuos-do-processamento-de-peixes>>. Acesso em: 20 set. 2024.

THE ENGINEERING TOOLBOX. **Fuels** - Higher and Lower Calorific Values: The Engineering Toolbox, 2003. Disponível em: <[https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d\\_169.html](https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html)> Acesso em: 21 out. 2024.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Eficiência Energética**. Brasil: Empresa de Pesquisa Energética, [2018]. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica>>. Acesso em: 23 out. 2024.

FAGNANI, K. C. **Comparação do potencial energético do lodo gerado no tratamento físico-químico de efluentes provenientes do abate de aves utilizando diferentes coagulantes**. 2017. 140 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Bioprodutos Agroindustriais). Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, Palotina, 2017.

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, p. 102996, 2019.

FAST TECNOLOGIA INDUSTRIAL. **Produto**: Tridecanter Centrífugo. s. d. Disponível em: <<https://www.fastindustria.com.br/produto/tridecanter-centrifugo/>> Acesso em: 15 out. 2024.

FERRARI, C. T. da R. R.; GENENA, A. K.; LENHARD, D. C. Use of natural coagulants in the treatment of food industry effluent replacing ferric chloride: a review. **Científica (Jaboticabal. Print)**, Medianeira, v. 44, p. 310, 2016.

FERREIRA, R. P. **Uso de coagulantes naturais como pré-tratamento de efluente de laticínio**. 2012. 73 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2012.

FILHO, G. E. F. F. **Máquinas Térmicas Estáticas e Dinâmicas**. 1. ed. São Paulo: Editora Érica, 2014. E-book. 196 p.

FILHO, S. S. F. **Tratamento de Água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento**. LTC, 2017, 472 p.

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**, v. 132, n. 1, p. 1-7, 2010.

FONSECA, R. R. **Monitoramento e controle avançado aplicados à flotação por ar dissolvido**. 2017. 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2017.

FRANCIOZI, S. A. **Uso de diferentes coagulantes no tratamento de efluente de abatedouro bovino e análise do potencial energético do lodo gerado**. 2020. 106 f. Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Setor Palotina, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2020.

GABBRIELLI, R.; BARONTINI, F.; FRIGO, S.; BRESSAN, L. Numerical analysis of bio-methane production from biomass-sewage sludge oxy-steam gasification and methanation process. **Applied Energy**, Italy, v. 307, p. 118292, 2022.

GARCIA, N. N. **Uso do lodo de flotador de abatedouro de aves na produção de biochar**. 2016. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão.

GARDUSI, F.; FILHO, A. M. R.; LUZ, P. H. M.; CARVALHO, G. R. L.; REIS, A. S.; BARROZO, M. A. S. Avaliação da distribuição do diâmetro de bolhas em coluna de flotação. In: **XIX Jornada de Engenharia Química**, UFU, Uberlândia, 2014.

GENTIL, L. V. B. **Tecnologia e economia do briquete de madeira**. 2008. 196 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

GIROTTO, A. T.; GIROTTO, F. J.; ANSCHAU, C. T.; SERPA, E. C. de S. N. Secagem de lodos de efluentes industriais para queima na caldeira como biomassa na geração de energia e redução de custos com a destinação dos resíduos. **Anais da Engenharia de Produção**, v. 2, n. 1, p. 175 - 190, 2018.

GONDIM, G. V. **Potencial de geração de energia a partir dos resíduos sólidos orgânicos e efluentes líquidos gerados em uma unidade agroindustrial**. 2017. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, UNESP, Ilha Solteira, 2017.

GUIMARÃES, C. M. M.; GALVÃO, V. Produção e uso do biogás. *In: Congresso Internacional de Bioenergia*, 8, 2013, São Paulo, **Resumos [...]**.

GURUNANI, P.; BHATNAGAR, P.; BISHT, B.; JAISWAL, K. K.; KUMAR, V.; KUMAR, S.; VLASKIN, M.; GRIGORENKO, A. V.; RINDIN, K. G. Recent advances and viability in sustainable thermochemical conversion of sludge to bio-fuel production. **Fuel**, v. 316, p. 123351, 2022.

HAARSLEV. **Digestor Batelada**. s. d. Disponível em: <<https://pt.haarslev.com/products/batch-cooker/>> Acesso em: 15 out. 2024.

HAN, J.; KIM, H. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: an overview. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Toyohashi, v. 12, n. 2, p. 397-416, 2008.

HANAUER, T. V.; ANDERLE, G. A.; DA COSTA, J. C.; DOLINE, J.; da SILVA, A. H. C. da; HERMES, E. Aplicação de coagulantes químico e orgânico para o tratamento de efluente de abatedouro avícola. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 2, p. 480-493, 2019.

HARRIS, P. W.; MCCABE, B. K. Review of pre-treatments used in anaerobic digestion and their potential application in high-fat cattle slaughterhouse wastewater. **Applied Energy**, Australia, v. 155, p. 560-575, 2015.

HELLER, L.; PÁDUA, V. L. **Abastecimento de água para consumo humano**. 3. ed. Minas Gerais: UFMG, 2016. 870 p.

HAGHIGHAT, M.; MAJIDIAN, N.; HALLAJISANI, A.; SAMIPOURGIRI, M. Production of bio-oil from sewage sludge: a review on the thermal and catalytic conversion by pyrolysis. **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, Iran, v. 42, p. 100870, 2020.

HU, M.; YE, Z.; ZHANG, H.; CHEN, B.; PAN, Z.; WANG, J. Thermochemical conversion of sewage sludge for energy and resource recovery: technical challenges and prospects. **Environmental Pollutants and Bioavailability**, China, v. 33, n. 1, p. 145-163, 2021.

ICAVI. **Caldeira Aquatubular**. s. d. Disponível em: <<https://icavi.ind.br/pt/equipamentos/caldeira-aquatubular-5.html>>. Acesso em: 15 out. 2024.

JELLALI, S.; KHIARI, B.; AL-HARRASI, M.; CHARABI, Y.; AL-SABAHI, J.; AL-ABRI, M.; USMAN, M.; AL-RAEESI A.; JEGUERIM, M. Industrial sludge conversion into biochar and reuse in the context of circular economy: impact of pre-modification processes on pharmaceuticals removal from aqueous solutions. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 33, p. 101114, 2023.

JEON, Y.; NAM, H.T.; LEE, S. Combustion and emission characteristics for various swirler geometries and fuel heating values in a premixed low swirl combustor system. **Energy**, v. 303, p. 131986, 2024.

KIANG, Y. H. **Fuel Property Estimation and Combustion Process**

**Characterization:** Conventional Fuels, Biomass, Biocarbon, Waste Fuels, Refuse Derived Fuel, and Other Alternative Fuels. Republic of China: Academic Press, 2018. 460 p.

KLUMB, A. K.; SAINZ, R. L. Caracterização de lodo ativado e lodo físico-químico de estação de tratamento de efluentes de indústrias de arroz parboilizado e de laticínios para geração de energia térmica. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, Pelotas, v. 5, n. 10, p. 677-689, 31 ago. 2018.

KOKALJ, F.; ARBITER, B.; SAMEC, N. Sewage sludge gasification as an alternative energy storage model. **Energy Conversion and Management**, Maribor, v. 149, p. 738-747, Oct. 2017.

KONRAD, O.; HEBERLE, A. N. A.; CASARIL, C. E.; KAUFMANN, G. V.; LUMI, M.; DALL'OGGIO, M.; SCHMITZ, M. Avaliação da produção de biogás e geração de metano a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes e glicerina residual. **Revista Destaques Acadêmicos**, Rio Grande do Sul, v. 2, n. 4, p. 49-55. 2010.

KYZAS, G. Z.; MATIS, K. A. Flotation in Water and Wastewater Treatment. **Processes**, Greece, v. 6, n. 8, p. 116, 2018.

JUPPA, A. M.; P. A. V.; ANDRIOLA, M. P.; DE LIMA, V. O. D.; DOS SANTOS, A. B.; DE OLIVEIRA, L. C.; DE OLIVEIRA, A. F. Pellets produzidos a partir da biomassa de capim elefante BRS Kurumi, lodo flotado e bagaço de mandioca. **Latin American Journal of Energy Research**, Palotina, v. 11, n. 1, p. 209–217, 2024.

LATIFI, P.; KARRABI, M.; DANESH, S. Anaerobic co-digestion of poultry slaughterhouse wastes with sewage sludge in batch-mode bioreactors (effect of inoculum-substrate ratio and total solids). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Mashhad, v. 107, p. 288-296, 2019.

LICHTY, L. C. **Combustion Engine Processes**. 6th ed. New York: McGraw-Hill, 1967, p. 61-91.

LIN, J.; COUPERTHWAITE, S.; MILLAR, G. J. Effectiveness of aluminium based coagulants for pre-treatment of coal seam water. **Separation and Purification Technology**, v. 177, p. 207–222, 2017.

LIPPEL. **Alimentação de Caldeiras**. LIPPEL: Agrolândia, s. d. Disponível em: <https://www.lippel.com.br/dosagem-de-combustivel-solido/alimentacao-de-caldeiras/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

LO MONACO, P. A.; DE MATOS, A. T.; RIBEIRO, I. C. A.; NASCIMENTO, F. da S.; SARMENTO, A. P. Utilização de extrato de sementes de moringa como agente coagulante no tratamento de água para abastecimento e águas residuárias.

**Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Viçosa, v. 5, n. 3, p. 222-231, 2010.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e transporte**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001. 482 p.

MACEDO, J. C. F. **Análise Térmica e ambiental da queima do lodo primário da Fabricação de papel e celulose em caldeira de biomassa a grelha**. 2006. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Curso de Engenharia Mecânica, IEM - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

MADEIRA, L.; TEIXEIRA, M. R.; ALMEIDA, A.; SANTOS, T.; CARVALHO, F. Reuse of lime sludge from immediate one-step lime precipitation process as a coagulant (aid) in slaughterhouse wastewater treatment. **Journal Of Environmental Management**, Faro, Portugal, v. 342, 2023.

MALDANER, T. L. **Levantamento das alternativas de minimização de impactos gerados pelos efluentes de abatedouros e frigoríficos**. 2008. 63 f. Monografia (Pós-graduação em Higiene e Inspeção de Produtos de Origem Animal), Universidade de Castelo Branco, Brasília, 2008.

MANGRICH, A. S.; DOUMER, M.; MALLMANN, A. S.; WOLF, C. R. Green chemistry in water treatment: use of coagulant derived from *Acacia mearnsii* tannin extracts. **Revista Virtual de Química**, v. 6, n. 1, p. 2-15, 2014.

MANTOVAN, F. de M.; TELEKEN, J. G.; DE OLIVEIRA, A. F.; BURIN, E.; BAZZO, E. **Co-combustion of Sludge from a Slaughterhouse Wasterwater Treatment Plant With Eucalyptus Woodchips in a Biomass Steam Generator**. *In: Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, 19., 2022, Bento Gonçalves.

MARAZZA, D.; MACRELLI, S.; D'ANGELI, M.; RIGHI, S.; HORNUNG, A.; CONTIN, A. Greenhouse gas savings and energy balance of sewage sludge treated through an enhanced intermediate pyrolysis screw reactor combined with a reforming process. **Waste Management**, v. 91, p. 42-53, 2019.

MATOS, A. T.; CABANELLAS, C. F. G; CECON, P. R.; BRASIL, M. S.; MUDADO, C. S. Efeito da concentração de coagulantes e do pH da solução na turbidez da água, em recirculação, utilizada no processamento dos frutos do cafeeiro. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 544-551, 2007.

MENDES, A. A.; CASTRO, H. F. de. Effect on the enzymatic hydrolysis of lipids from dairy wastewater by replacing Gum Arabic emulsifier for sodium chloride. **Brazilian Archives Of Biology And Technology**, Lorena, v. 48, p. 135-142, 2005.

MIGLIACCIO, R.; BRACHI, P.; MONTAGNARO, F.; PAPA, S.; TAVANO, A.; MONTESARCHIO, P.; RUOPOLLO, G.; URCIUOLO, M. Sewage Sludge Gasification in a Fluidized Bed: experimental investigation and modeling. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Napoli, v. 60, n. 13, p. 5034-5047, 2021.

MIELE, Marcelo; SANDI, Ari J. Panorama da suinocultura. **Anuário 2024 da Suinocultura Industrial**, São Paulo, n. 06, p. 20-28, 2023.

MOKTADIR, M. A.; REN, J.; ZHOU, J. A systematic review on tannery sludge to energy route: current practices, impacts, strategies, and future directions. **Science of the Total Environment**, Hong Kong, v. 901, Nov. 2023.

MTE – Ministério do Trabalho e Emprego. Norma Regulamentadora No. 13 (NR-13) - Vasos sob pressão. **Diário Oficial da União**, 1978.

NETO, D. V. **Estudo da pirólise de lodo sanitário, visando sua valorização energética**. 2012. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, 2012. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/96388>>. Acesso em: 25 out. 2024.

NEUMANN, J.; BINDER, S.; APFELBACHER, A.; GASSON, J. R.; GARCÍA, P. R.; HORNUNG, A. Production and characterization of a new quality pyrolysis oil, char and *syngas* from digestate – Introducing the thermo-catalytic reforming process. **Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis**, v. 113, p. 137-142, 2015.

NIESSEN, W. R. **Combustion and incineration processes: applications in environmental engineering**. New York: M. Dekker, 1995. 659 p.

NIPATTUMMAKUL, N.; AHMED, I. I.; KERDSUWAN, S.; GUPTA, A. K. Hydrogen and *syngas* production from sewage sludge via steam gasification. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 35, n. 21, p. 11738-11745, Nov. 2010.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. Caracterização energética da biomassa vegetal. **MME - Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida–Soluções Energéticas para a Amazônia**, Brasília, v. 1, p. 52-63, 2008.

NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 6. ed. Aracaju: Gráfica Editora J. Andrade, 2012. 315 p.

ORTIZ-OLIVEROS, H. B.; FLORES-ESPINOSA, R. M. Simultaneous removal of oil, total radioactive liquid waste by flotation of dissolved air. **Int. J. environ. sci. technol.**, Mexico, n.16, p.3679-3686, 2019.

PADILHA, J.; KUREK, A. P.; SOUZA, O.; SELLIN, N. Avaliação da potencialidade energética de lodos gerados no tratamento de efluentes de abatedouro e frigorífico de aves. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE, 30, 2019, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: AESabesp, p. 1 – 17, 2019.

PAGÉS-DÍAZ, J.; PEREDA-REYES, I.; SANZ, J. L.; LUNDIN, M.; TAHERZADEH, M. J.; HORVÁTH, I. S. A comparison of process performance during the anaerobic mono-and co-digestion of slaughterhouse waste through different operational modes. **Journal of Environmental Sciences**, China, v. 64, p. 149-156, 2018.

PANDEY, K.; SINGH, B.; PANDEY, A. K.; BADRUDDIN, I. J.; PANDEY, S.; MISHRA, V. K.; JAIN, P. A. Application of microbial enzymes in industrial wastewater treatment. **Int. J. Curr. Microbiol. App. Sci**, India, v. 6, n. 8, p. 1243-1254, 2017.

PARK, S.; YOON, Y.-M.; HAN, S. K.; KIM, D.; KIM, H. Effect of hydrothermal pre-treatment (HTP) on poultry slaughterhouse waste (PSW) sludge for the enhancement of the solubilization, physical properties, and biogas production through anaerobic digestion. **Waste Management**, Kyeonggido, v. 64, p. 327-332, 2017.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor e turbidez elevada**. 2001. 233 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PEDROZA, M. M.; VIEIRA, G. E. G.; DE SOUZA, J. F.; PICKLER, A. de C.; LEAL, E. R. M.; MILHOMEN, C. da C. Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, p. 89-188, 2010.

PEIXE BR – Associação Brasileira da Psicultura. Anuário Brasileiro da Psicultura 2023. São Paulo: Texto Comunicação Corporativa, 2023.

PENNA, R.; OLIVEIRA, M. L. M.; VALADÃO, G. E. S.; PERES, A. E. C. Estudo comparativo entre dois sistemas de aeração de coluna de flotação. **Revista escola de minas**, Ouro Preto, v. 56, n. 3, p. 195-200, 2003.

PEREIRA, A. S.; SHITSUKA, D. M.; PARREIRA, F. J.; SHITSUKA, R. **Metodologia da pesquisa científica**. 1. ed. Santa Maria: UAB/NTE/UFSM, 2018. 119 p.

POLI, D. de C. R.; ZANCHETA, M. N.; BOARI, Z. de M.; MELDONIAN, N. L.; DE MOURA, C. L.; JIURGIU, P. A. Uma avaliação das metodologias para determinação do poder calorífico dos resíduos sólidos urbanos. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, São Caetano do Sul, v. 8, n. 8, p. 9-31, 2013.

PONTE, M. R. **Blendas de bagaço de cana-de-açúcar: Caracterização das propriedades e investigação da viabilidade técnica**. 2017. 69 p. Monografia (Bacharel em Engenharia de Energias) – Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Acarape, 2017.

POZZOBON, L., KEMPKA, A. P. Sementes de moringa oleifera na clarificação de efluente de indústria de ingredientes para alimentação animal: Comparação com o coagulante convencional e estudo das condições operacionais. **Engevista**, v. 17, n. 2, p. 196-206, 2015.

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

QUIRINO, W. F.; DO VALE, A. T.; DE ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. dos S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da Madeira**, Brasília, n. 89, p. 100-106, Abr. 2005.

RENDEIRO, G.; NOGUEIRA, M. F. M. **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia (MME), 2008, p. 42.

RESTREPO, J. C. P. S.; DAMACENO, F. M.; CHIARELOTTO, M.; BOFINGER, J.; NIEDZIALKOSKI, R. K.; COSTA, L. A. de M. Sugarcane juice improves energy production in the anaerobic co-digestion with flotation sludge from broiler slaughter. **Fuel**, Cascavel, v. 330, 2022.

RODRIGUES, T. O. **Efeito da torrefação no condicionamento de biomassa para fins energéticos**. 2009. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Faculdade de Tecnologia, Departamento de Energia Florestal, Brasília (DF), 2019.

ROSSI, D. *et al.* Pyrolyzed tannery sludge as adsorbent of volatile organic compounds from tannery air emissions. **Chemical Engineering Journal**, Pisa, v. 454, 2023.

SALEHIYOUN, A. R.; CAPELLO, M.; ANTOGNOLI, M.; BRUNAZZI, E.; SEGGIANI, M. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and slaughterhouse waste in existing wastewater digesters. **Renewable Energy**, v. 145, p. 2503-2509, Jan. 2020.

SARKAR, D. Fuels and Combustion. *In*: SARKAR, Dipak. **Thermal Power Plant: design and operation**. Jadavpur University: Elsevier, 2015. p. 91-137.

SCARASSATI, D.; CARVALHO, R. F. de; DELGADO, V. de L.; CONEGLIAN, C. M. R.; DE BRITO, N. N.; TONSO, S.; SOBRINHO, G. D.; PELEGRINI, R. **Tratamento de efluentes de matadouros e frigoríficos**. *In*: III Fórum de Estudos Contábeis, 2003, Rio Claro. Rio Claro: UNICAMP, 2003.

SCHMITT, D. M. F.; FAGUNDES-KLEN, M. R.; VEIT, M. T.; BERGAMASCO, R.; FERRANDIN, A. T. Estudo da eficiência do composto ativo de moringa oleífera extraída com soluções salinas na tratabilidade de águas residuárias da indústria de laticínios. **Engevista**, Maringá, v. 16, n. 2, p. 221-231, 2014.

SCHMITT, N.; APFELBACHER, A.; JÄGER, N.; DASCHNER, R.; STENZEL, F.; HORNUNG, A. Thermo-chemical conversion of biomass and upgrading to biofuel: The Thermo-Catalytic Reforming process: a review. **Biofuels, Bioproducts And Biorefining**, Germany, v. 13, n. 3, p. 822-837, 2019.

SCHUTZ, F. C. A; ANAMI, M.H; TRAVESSINI, R. Desenvolvimento e ensaio de briquetes fabricados a partir de resíduos ligno-celulóticos da agroindústria. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, Medianeira, v. 1, n. 1, p. 3-8, 2010.

SEMA - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Resolução SEMA nº 16, de 26 de fevereiro de 2014. Define critérios para o Controle da Qualidade do Ar como um dos instrumentos básicos da gestão ambiental para

proteção da saúde e bem estar da população e melhoria da qualidade de vida.

**Diário Oficial do Estado do Paraná**, Paraná, 15 abr. 2014. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=269324> SEMA 016/14>. Acesso em: 20 out. 2024.

SEMA - Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Resolução SEMA nº 42, de 22 de julho de 2008. Estabelece critérios para a queima de resíduos em caldeiras e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado do Paraná**, Paraná, 25 jul. 2008. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=143911>>. Acesso em: 20 out. 2024.

SENA, R. F. **Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para geração de energia**. 2005. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SENA, R. F.; CLAUDINO, A.; MORETTI, K.; BONFANTI, Í. 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**, v. 52, n. 3, p. 557-569, 2007.

SHARMA, N. K.; KUMAR, V.; VERMA, P.; SHARMA, M.; KHALIL, A. A.; DAIM, T. Industry 4.0 factors affecting SMEs towards sustainable manufacturing. **Technology In Society**, Portland, v. 79, p. 102746, 2024.

SHIVAPRASAD, K. V.; HESLOP, J.; ROY, D.; MALIK, A.; WANG, Y.; ROSKILLY, A. P.; BAO, H. Hydrogen rich *syngas* production through sewage sludge pyrolysis: a comprehensive experimental investigation and performance optimisation using statistical analysis. **Process Safety and Environmental Protection**, Durham, v. 187, p. 270-278, Jul. 2024.

SILVA, C. A.; SILVEIRA, C.; DA SILVA, F. A.; KLEN, M. R. F.; BERGAMASCO, R. **Classificação dos lodos formados durante o processo de coagulação/floculação da água com os coagulantes PAC e moringa oleifera**. *Engevista*, Maringá, v. 14, n. 3, p. 302- 309, 2012.

SILVA, J. P.; BRAND, M. A.; SOARES, P. R. C.; SALAMON, M. de L.; RODRIGUES, T. M.; GÜTTLER, G. **Compaction as a sustainable alternative to dried sludge from poultry slaughterhouse wastewater for energy generation**. *Ciência Rural*, Lages, v. 51, n. 12, 2021.

SILVA-MARTÍNEZ, R. D.; SANCHES-PEREIRA, A.; ORTIZ, W.; GALINDO, M. F. G.; COELHO, S. T. The state-of-the-art of organic waste to energy in Latin America and the Caribbean: Challenges and opportunities. **Renewable Energy**. São Paulo, v. 156, p. 509-525, 2020.

SPERLING, V. M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 470 p.

STRÖHER, A. P.; MENEZES, M. L.; BERGAMASCO, R.; PEREIRA, N. C. Utilização de Coagulantes Naturais no Tratamento de Efluente Proveniente de Lavagem de Jeans. **Engevista**, Maringá, v. 15, n. 3, p.255-260, 2013.

SULMETAX. **Flotador por ar dissolvido**. s. d. Disponível em: <<https://www.sulmetax.ind.br/flotador-ar-dissolvido>>. Acesso em: 15 out. 2024.

SUSTAINABLE CARBON. **Como são gerados os créditos de carbono**. 2024. Disponível em: <<https://sustainablecarbon.com/como-sao-gerados-os-creditos-de-carbono/>>. Acesso em: 10 out. 2024.

TANAC. **Tanfloc SG**. Tanac S. A. Rio Grande do Sul. 2016. Disponível em: <[https://www.tanac.com.br/novo/wp-content/uploads/2021/06/CT\\_TANFLOC\\_SG\\_PT\\_0-1.pdf](https://www.tanac.com.br/novo/wp-content/uploads/2021/06/CT_TANFLOC_SG_PT_0-1.pdf)> Acesso: 9 de novembro de 2024.

TARNAWSKI, W. Emission Factors for Combustion of Biomass Fuels in the Pulp and Paper Mills. **Fibres & Textiles in Eastern Europe**, University of Łódź, Poland, v. 12, n. 3, p. 91-97, 2004.

TEIXEIRA, T. C. **Análise de cenários para a queima conjunta de lodo industrial e cavaco de eucalipto para geração de vapor de processo em abatedouro de aves**. 2023. 48 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Energia), Universidade Federal do Paraná, Palotina.

TENG, W.; ZOU, Y.; LIAO, Y.; CHEN, Z.; QI, X.; MA, X. Characteristics of heavy metal migration in the gasification-combustion process of rural solid waste: influencing factors and mechanisms. **Waste Management**, China, v. 190, p. 350-359, 2024.

TOGAWA, V. **Os Principais Tipos de Caldeiras**. 30 set. 2020. Disponível em: <https://togawaengenharia.com.br/blog/os-principais-tipos-de-caldeiras/>. Acesso em: 10 nov. 2024.

TRUGILHO, P. F. **Energia da Biomassa Florestal**. *In*: Congresso Florestal Paranaense, 4., 2012, Curitiba.

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL (UCS). **COMPOSTAGEM: Produção de fertilizantes a partir de resíduos orgânicos**. Caxias do Sul: FAPERGS, 2024. 15. Disponível em: <<https://www.ucs.br/site/midia/arquivos/cartilha-agricultores-compostagem.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2024.

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

VAZ, L. G. L.; KLEN, M. R. F.; VEIT, M. T.; DA SILVA, E. A.; BARBIERO, T. A.; BERGAMASCO, R.. Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. **Eclética Química**, São Paulo, v. 35, n. 4, p. 45 – 54, 2010.

VIRMOND, E. **Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia**. 2007. 137 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

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 - A case study. In: Proceedings of the 23rd International Conference on Solid Waste Technology and Management, 23, 2008, Philadelphia. **Anais [...]**. Philadelphia: p. 1177-1188, 2008.

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

WENDER, I. Reactions of synthesis gas. **Fuel Processing Technology**, v. 48, n. 3, p. 189-297, 1996.

YIN, C. Y. Emerging Usage of Plant-Based Coagulants for Water and Wastewater Treatment. **Process Biochemistry**, Malaysia, v. 45, n. 9, p. 1437-1444, 2010.

ZANOL, M. B.; LIMA, J. P. P.; ASSEMANY, P.; AGUIAR, A. Assessment of characteristics and treatment processes of wastewater from slaughterhouses in the state of Minas Gerais, Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 358, p. 120862, 2024.

ZARPELON, W.; AZZOLINI, J. C. Caldeiras De Alta Pressão: Caracterização e Avaliação da Qualidade do Tratamento das Águas de Abastecimento. **Unoesc & Ciência – ACET**, Joaçaba, v. 6, n. 2, p. 141-154, 2015.

ZHENG, G; KOZIŃSKI, J. A. Thermal events occurring during the combustion of biomass residue. **Fuel**, v. 79, n. 2, p. 181-192, 2000.