

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL LUCA DE LIMA

POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DO LODO BIOLÓGICO GERADO NO  
SISTEMA TRATAMENTO DE EFLUENTES EM COMPLEXO AGROINDUSTRIAL

Palotina

2025

GABRIEL LUCA DE LIMA

POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DO LODO BIOLÓGICO GERADO NO  
SISTEMA TRATAMENTO DE EFLUENTES EM COMPLEXO AGROINDUSTRIAL

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

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Eliane Hermes

Palotina  
2025

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

L732 Lima, Gabriel Luca de  
Potencial de aproveitamento do lodo biológico gerado no  
sistema tratamento de efluentes em complexo agroindustrial  
/ Gabriel Luca de Lima. – Palotina, PR, 2025.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná,  
Setor Palotina, PR, Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia.  
Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Eliane Hermes.

1. Biorremediação. 2. Resíduos agroindustriais.  
3. Sustentabilidade. I. Hermes, Eliane. II. Universidade  
Federal do Paraná. III. Título.

CDU 62

Bibliotecária: Aparecida Pereira dos Santos – CRB 9/1653

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação BIOTECNOLOGIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **GABRIEL LUCA DE LIMA**, intitulada: **POTENCIAL DE APROVEITAMENTO DO LODO BIOLÓGICO GERADO NO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM COMPLEXO AGROINDUSTRIAL**, sob orientação da Profa. Dra. ELIANE HERMES, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

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

PALOTINA, 29 de Agosto de 2025.

Assinatura Eletrônica

02/09/2025 10:13:56.0

ELIANE HERMES

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

02/09/2025 11:33:59.0

RAQUEL STROHER

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

02/09/2025 13:46:02.0

TANIA SILA CAMPIONI MAGON

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

À minha família, alicerce da minha vida, por me ensinarem que disciplina e amor caminham juntos. Sem o apoio incondicional de vocês, este sonho não teria se tornado realidade.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela saúde, pela força nos momentos de dificuldade e pela oportunidade de trilhar este caminho de aprendizado e superação.

Aos meus pais, pelo apoio incondicional, pelas palavras de incentivo e pela compreensão nos momentos de ausência. Vocês foram a base sólida que sustentou minha caminhada.

À minha namorada, pelo apoio constante, pela presença nos momentos mais desafiadores desta pesquisa e, sobretudo, por acreditar no meu potencial.

À minha orientadora, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eliane Hermes pela paciência, dedicação e pela forma incansável com que sempre me incentivou a seguir em frente neste projeto.

Aos professores do programa de pós-graduação, pela dedicação, paciência e partilha de conhecimento, que contribuíram de maneira inestimável para a realização deste trabalho.

Aos colegas Letícia Sell Richter, Gabriel Kegler e Gabrieli Maria Huff, pela colaboração e apoio fundamentais na condução desta pesquisa, contribuindo de forma significativa para seus resultados.

Aos colegas de mestrado, pela troca de experiências, pelo companheirismo e pelas discussões que enriqueceram tanto a pesquisa quanto a jornada acadêmica.

À empresa onde atuo e aos colegas da equipe de Gestão Ambiental, que prontamente me ajudaram na disponibilização e coleta do material utilizado nessa pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste mestrado. Este trabalho é fruto de uma soma de esforços, aprendizados e parcerias que levarei para toda a vida.

## RESUMO

O aumento da geração de resíduos provenientes de atividades agroindustriais, em especial do setor de abate e processamento de carnes, representa um desafio ambiental significativo. Entre esses resíduos, o lodo biológico proveniente das estações de tratamento de efluentes apresenta elevado teor de umidade e composição complexa, limitando seu descarte e demandando alternativas que conciliem sustentabilidade e eficiência. Nesse contexto, a valorização desse material surge como uma oportunidade de reduzir impactos ambientais, promover a economia circular e gerar novos recursos energéticos e biotecnológicos. O presente estudo teve como objetivo caracterizar o lodo biológico oriundo da estação de tratamento de efluentes de um complexo agroindustrial composto por abatedouro de aves, de peixes e unidade de industrializados de aves, com foco em avaliar seu potencial de aproveitamento energético e microbiológico para aplicações sustentáveis. A metodologia contemplou análises físico-químicas e biológicas. Do ponto de vista energético, foram determinados teores de umidade, sólidos totais, voláteis, cinzas, carbono fixo e poder calorífico superior (PCS). Esses parâmetros permitem estimar a viabilidade do uso do lodo como combustível alternativo, seja de forma direta ou por meio de pré-tratamentos. Na vertente microbiológica, foram realizados ensaios de isolamento e identificação de bactérias, seguidos de classificação e avaliação de atividades enzimáticas (amilolítica, proteolítica, celulolítica e lipolítica), visando verificar seu potencial de aplicação em processos de biorremediação e biotecnologia. Os resultados físico-químicos evidenciaram que o lodo possui elevado teor de umidade e baixos sólidos totais, o que limita sua utilização direta como combustível. No entanto, a análise imediata demonstrou predominância da fração volátil, teor moderado de carbono fixo e presença relevante de cinzas, fatores determinantes na eficiência de combustão. O PCS obtido situou-se na faixa relatada para lodos agroindustriais (2.000–4.000 kcal/kg base seca), indicando potencial de aproveitamento energético, especialmente se submetido a processos como secagem, co-combustão ou tratamentos termoquímicos. Na avaliação microbiológica, observou-se diversidade de microrganismos, e um destaque positivo para *Bacillus cereus*, que apresentou resposta, ainda que discreta, nos ensaios enzimáticos realizados. Esse resultado evidencia um potencial inicial de exploração biotecnológica, sugerindo que futuros estudos de prospecção microbiana podem revelar microrganismos com maior capacidade de degradação de compostos de interesse. Dessa forma, este estudo contribui para a compreensão das propriedades do lodo e reforça a importância de buscar soluções inovadoras que unam gestão de resíduos, sustentabilidade e geração de valor para o setor agroindustrial.

Palavras-chave: Valorização energética; Biorremediação; Resíduos agroindustriais; Atividade enzimática; Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The increasing generation of residues from agro-industrial activities, particularly from the meat processing sector, poses a significant environmental challenge. Among these residues, biological sludge from wastewater treatment plants presents high moisture content and complex composition, which limits its direct disposal and demands alternatives that combine sustainability and efficiency. In this context, the valorization of this material emerges as an opportunity to reduce environmental impacts, foster circular economy practices, and generate new energetic and biotechnological resources. This study aimed to characterize the biological sludge generated by the wastewater treatment plant of an agro-industrial complex composed of poultry and fish slaughterhouses and a poultry processing unit, focusing on evaluating its potential for energetic and microbiological applications with sustainable purposes. The methodology involved physicochemical and biological analyses. From the energetic perspective, moisture content, total solids, volatile matter, ash, fixed carbon, and higher heating value (HHV) were determined. These parameters allow the assessment of the feasibility of using sludge as an alternative fuel, either directly or through pre-treatment processes. On the microbiological side, bacterial isolation and identification assays were performed, followed by classification and evaluation of enzymatic activities (amylolytic, proteolytic, cellulolytic, and lipolytic), aiming to verify its potential use in bioremediation and biotechnological processes. The physicochemical results showed that the sludge had a high moisture content and low total solids, which restricts its direct use as fuel. However, proximate analysis indicated a predominance of volatile matter, moderate fixed carbon content, and a significant presence of ash, which are key factors influencing combustion efficiency. The HHV obtained was within the reported range for agro-industrial sludges (2,000–4,000 kcal/kg on a dry basis), indicating energetic potential, particularly when subjected to processes such as drying, co-combustion, or thermochemical treatments. Microbiological evaluation revealed microbial diversity, with *Bacillus cereus* standing out by showing a positive, albeit modest, response in the enzymatic assays. This result highlights an initial potential for biotechnological exploration, suggesting that future microbial prospecting studies may identify strains with greater degradation capacity for compounds of interest. In conclusion, agro-industrial biological sludge, despite the limitations imposed by its high moisture content, presents promising characteristics for both energetic applications, when adequately pre-treated, and microbiological exploitation, particularly in the field of industrial and environmental enzymes. This study therefore contributes to a better understanding of sludge properties and reinforces the importance of developing innovative solutions that integrate waste management, sustainability, and value generation for the agro-industrial sector.

**Keywords:** Energy recovery; Bioremediation; Agro-industrial residues; Enzymatic activity; Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMA DAS UNIDADES E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE LODOS ATIVADOS .....	24
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DO FLOCO DE LODO BIOLÓGICO .....	26
FIGURA 3 - FLUXOGRAMA DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA EM ESTUDO .....	42
FIGURA 4 - GRUPOS MORFOLÓGICOS DAS BACTÉRIAS ISOLADAS .....	65
FIGURA 5 - BACTÉRIAS ISOLADAS DO LODO BIOLÓGICO PROVENIENTE DE UM COMPLEXO AGROINDUSTRIAL .....	66
FIGURA 6 - DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL AMILOLÍTICO DOS ISOLADOS POR ENSAIO EM ÁGAR AMIDO .....	71
FIGURA 7 - DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL PROTEOLÍTICO DOS ISOLADOS .....	72
FIGURA 8 - DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL CELULOLÍTICO DOS ISOLADOS	73
FIGURA 9 - DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL LIPOLÍTICO DOS ISOLADOS .....	74

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DE EFLUENTES BRUTOS DE ABATEDOURO DE AVES .....	19
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DE EFLUENTES BRUTOS DE ABATEDOURO DE PEIXES .....	19
TABELA 3 - PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO CONAMA 430/2011 .....	21
TABELA 4 - CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS EM FUNÇÃO DA IDADE DO LODO .....	25
TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO UTILIZADA PARA AGRUPAR OS ORGANISMOS DA MICROFAUNA .....	28
TABELA 6 - COMPOSIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO FLOCO DE LODO .....	29
TABELA 7 - COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS NATURAIS E MECÂNICOS DE SECAGEM DE LODO .....	30
TABELA 8 - PODER CALORÍFICO SUPERIOR MÉDIO DE BIOMASSA ENCONTRADAS NA LITERATURA. ....	37
TABELA 9 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE TEOR DE umidade, COM RESPECTIVAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E ERROS PADRÃO. ....	50
TABELA 10 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS, COM RESPECTIVAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E ERROS PADRÃO. ....	52
TABELA 11 - DADOS CLIMÁTICOS PARA A REGIÃO OESTE PARANAENSE NO ANO DE 2024 (JUN A NOV).....	53
TABELA 12 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE TEOR DE VOLÁTEIS, COM RESPECTIVAS MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO.....	54
TABELA 13 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE TEOR DE cinzas, COM RESPECTIVAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E ERROS PADRÃO .....	56
TABELA 14 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE TEOR DE carbono fixo, COM RESPECTIVAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E ERROS PADRÃO .....	58
TABELA 15 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE pOder calorífico superior, COM RESPECTIVAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E ERROS PADRÃO (Cal/g) .....	60
TABELA 16 - PRINCIPAIS FONTES DE BIOMASSA E SEUS RESPECTIVOS POTENCIAIS CALORÍFICOS .....	62

TABELA 17 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS BACTÉRIAS ISOLADAS DO LODO BIOLÓGICO PROVENIENTE DE UM COMPLEXO AGROINDUSTRIAL .....	65
TABELA 18 - rESULTADO DO BLAST PARA O SEQUENCIAMENTO .....	66

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	13
2.1.1	Objetivos específicos .....	13
2.2	JUSTIFICATIVA .....	14
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>15</b>
3.1	DISPONIBILIDADE E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS .....	15
3.2	PANORAMA DA INDÚSTRIA DE AVES, PEIXES E TERMOPROCESSADOS .....	15
3.2.1	Avicultura brasileira.....	15
3.2.2	Aquicultura brasileira .....	16
3.3	CONSUMO HÍDRICO E IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL .....	17
3.4	LEGISLAÇÃO PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS.....	20
3.5	SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS .....	22
3.5.1	Lodo biológico.....	23
3.5.2	Composição do lodo biológico .....	26
3.5.3	Microbiologia dos lodos ativados .....	27
3.5.4	Composição, características e métodos de secagem do lodo biológico.....	29
3.6	POTENCIAL DE REAPROVEITAMENTO DO LODO BIOLÓGICO GERADO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO .....	30
3.6.1	Principais métodos de valorização (bioenergia, agricultura, biorremediação) .....	31
3.6.2	Uso da biomassa residual para geração de energia.....	34
3.6.3	Análise imediata .....	35
3.6.4	Poder calorífico superior .....	36
3.7	ESTUDO PRELIMINAR DA PRODUÇÃO E ATIVIDADE ENZIMÁTICA .....	37
3.7.1	Proteases.....	37

3.7.2	Amilases .....	38
3.7.3	Celulases .....	39
3.7.4	Lipases .....	39
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
4.1	LOCAL DO ESTUDO .....	41
4.2	SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA EMPRESA .....	41
4.3	PROCEDIMENTOS DE COLETA .....	42
4.4	POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO .....	43
4.4.1	Análise imediata .....	43
4.4.2	Teor de umidade .....	43
4.4.3	Teor de materiais voláteis .....	44
4.4.4	Teor de cinzas.....	45
4.4.5	Carbono fixo .....	45
4.4.6	Poder Calorífico Superior (PCS).....	46
4.5	CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO LODO GERADO.....	46
4.5.1	Isolamento de bactérias.....	46
4.5.2	Seleção e preservação das cepas bacterianas .....	47
4.5.3	Extração de DNA de isolados bacterianos.....	47
4.6	AVALIAÇÃO QUALITATIVA DE ATIVIDADE ENZIMÁTICA .....	48
4.6.1	Atividade amilolítica .....	48
4.6.2	Atividade proteolítica.....	48
4.6.3	Atividade celulolítica .....	48
4.6.4	Atividade lipolítica .....	49
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
5.1	TEOR DE UMIDADE E SÓLIDOS .....	50
5.2	MATERIAIS VOLÁTEIS .....	54
5.3	TEOR DE CINZAS.....	56

5.4 CARBONO FIXO .....	57
5.5 PODER CALORÍFICO SUPERIOR.....	59
5.6 CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO LODO .....	64
5.6.1 Bacillus spp.....	67
5.6.2 Kurthia sp.....	69
5.7 ATIVIDADES ENZIMÁTICAS DAS BACTÉRIAS ISOLADAS .....	70
5.7.1 Atividade amilolítica .....	70
5.7.2 Atividade proteolítica.....	72
5.7.3 Atividade celulolítica .....	73
5.7.4 Atividade lipolítica .....	73
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>76</b>
6.1 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A agroindústria brasileira desempenha papel central na economia nacional e no abastecimento de alimentos para os mercados interno e externo, mas também figura entre as maiores geradoras de resíduos líquidos e sólidos (Guedes et al., 2021). Embora esses resíduos sejam ricos em nutrientes e compostos bioativos, seu descarte irregular ainda é frequente, resultando em impactos ambientais significativos e contribuindo para o efeito estufa e o aquecimento global (Ceregatti, 2022). Essa realidade configura uma problemática especialmente nas unidades de abate e processamento de proteína animal, onde o tratamento e a destinação final dos resíduos representam desafios críticos (Guedes et al., 2021).

Nas últimas décadas, as discussões em torno das questões ambientais têm se intensificado, sobretudo no setor agroindustrial, cuja atuação exerce forte pressão sobre os recursos naturais. No caso dos frigoríficos, a conformidade com normas ambientais passou a constituir fator estratégico, diretamente relacionado à mitigação de impactos e à sustentabilidade operacional. Ademais, a competitividade crescente no mercado internacional tem impulsionado as empresas não apenas ao cumprimento da legislação, mas também à adoção de práticas ambientais padronizadas e transparentes, conduzindo à reestruturação de políticas corporativas voltadas para o comércio exterior e a redução de passivos ambientais (Guedes, 2022).

A escolha de tecnologias de tratamento de efluentes requer o conhecimento detalhado das características do resíduo gerado, considerando os padrões de lançamento, o desempenho esperado e aspectos técnicos e econômicos (Garfi, Flores e Ferrer, 2017). Entre as opções disponíveis, destacam-se os processos biológicos, em especial o sistema de lodos ativados, amplamente empregado em estações de tratamento aeróbio. Esse método baseia-se na oxidação da matéria orgânica por microrganismos em suspensão, resultando na formação de um subproduto conhecido como lodo biológico ou lodo biológico (Metcalf e Eddy, 2016).

Em consonância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a disposição final em aterros sanitários deve ser considerada apenas como última alternativa, priorizando-se a reciclagem e o aproveitamento em usos benéficos, inclusive no caso do lodo de estações de tratamento de esgoto (Brasil, 2010). Contudo, dados da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico revelam que cerca de 63% desses resíduos ainda são enviados a aterros, 21% a áreas irregulares e menos

de 2% são reciclados, evidenciando os custos, os impactos ambientais e a necessidade urgente de soluções sustentáveis, apesar de já existirem experiências exitosas (Costa et al., 2025).

Nesse contexto, o presente trabalho busca caracterizar o lodo biológico gerado em uma estação de tratamento de efluentes de um complexo agroindustrial composto por abatedouros de aves, peixes e uma unidade de produtos industrializados. A partir de análises laboratoriais imediatas — como teor de sólidos voláteis, cinzas e carbono fixo — busca-se avaliar seu potencial energético por meio da queima em caldeiras, bem como sua viabilidade microbiológica para processos de biorremediação, com ênfase na atividade enzimática de bactérias isoladas.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O estudo teve como objetivo caracterizar o lodo biológico proveniente de uma estação de tratamento de efluentes de um complexo agroindustrial, avaliando seu potencial de aproveitamento energético e microbiológico para aplicações sustentáveis.

#### **2.1.1 Objetivos específicos**

- Determinar as características físico-químicas imediatas do lodo biológico, como teor de sólidos voláteis, cinzas e carbono fixo;
- Avaliar o potencial energético do lodo por meio da determinação do seu poder calorífico superior (PCS);
- Investigar a viabilidade microbiológica do lodo biológico para aplicação em processos de biodegradação, através de degradações enzimáticas;
- Contribuir para a discussão sobre alternativas sustentáveis à disposição final do lodo em aterros.

## 2.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com a Declaração Universal dos Direitos da Água, proclamada pela Organização das Nações Unidas (ONU), a água é reconhecida como um patrimônio essencial do planeta, cuja preservação constitui responsabilidade coletiva da humanidade. O documento enfatiza que esse recurso deve ser compreendido como um empréstimo às futuras gerações, destacando sua importância vital para a saúde, para a manutenção do equilíbrio ambiental e, de forma mais ampla, para a própria continuidade da vida. Ao reconhecer a água como um bem comum a todos os seres, a declaração reforça a necessidade de práticas responsáveis e sustentáveis em sua gestão e utilização (Barreiros, 2022).

As indústrias de alimentos demandam grandes volumes de água em seus processos produtivos, a fim de assegurar a qualidade dos produtos destinados ao consumo. Esse consumo está diretamente relacionado a fatores como a espécie abatida, a escala de produção, as tecnologias empregadas e o nível de comprometimento da indústria com práticas sustentáveis. Contudo, após seu uso, estima-se que entre 80% e 95% dessa água seja convertida em efluente industrial, cujas características variam conforme a fonte geradora. Assim, torna-se imprescindível que esses efluentes passem por etapas adequadas de tratamento antes de sua disposição em corpos hídricos receptores, de modo a minimizar os impactos ambientais decorrentes de sua descarga (Simadon, 2021).

Os sistemas de tratamento de efluentes geram expressivas quantidades de resíduos sólidos, que, em países em desenvolvimento, muitas vezes são negligenciados e descartados sem o devido tratamento em corpos hídricos, ocasionando sérios impactos ambientais e de saúde pública (Ribas, 2020).

Diante desse cenário, torna-se relevante a caracterização do lodo biológico proveniente de um complexo agroindustrial, de modo a avaliar alternativas de aproveitamento sustentável que contribuam para a redução de passivos ambientais, o atendimento às diretrizes legais vigentes e a promoção da sustentabilidade no setor agroindustrial.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 DISPONIBILIDADE E GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

A água é um recurso essencial e insubstituível, porém finito e desigualmente distribuído. Cerca de 97,5% é salgada e apenas 2,5% doce; dessa fração, menos de 0,5% encontra-se disponível em rios, lagos e na atmosfera para consumo humano (Köhler, 2024). O Brasil concentra cerca de 12% da água doce superficial do planeta, o que lhe confere papel estratégico na gestão sustentável desse recurso (Neto, 2024). Apesar disso, cerca de 40% da população mundial já vive sob estresse hídrico, percentual que tende a aumentar até 2050 sem ações efetivas de preservação (Lima, 2024).

A disponibilidade hídrica relaciona-se diretamente aos usos industriais, agropecuários e domésticos. Após o consumo, a água frequentemente retorna poluída ao meio, ampliando os desafios de abastecimento e exigindo soluções inovadoras de tratamento e reaproveitamento (Köhler, 2024). Segundo a ANA (2024), a retirada de água para usos consuntivos no Brasil deve crescer 42% até 2040, sendo a irrigação, o abastecimento urbano e a indústria os principais consumidores. Em resposta, a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997) busca garantir a disponibilidade de água em qualidade e quantidade adequadas às gerações presentes e futuras (Brasil, 1997).

O setor industrial, especialmente o de alimentos, é um dos maiores demandantes, empregando grandes volumes de água em processos de lavagem e produção, o que resulta em efluentes altamente poluentes e elevado consumo energético. Tal cenário reforça a urgência na adoção de tecnologias sustentáveis para uso, tratamento e reaproveitamento da água (Neto, 2024).

#### 3.2 PANORAMA DA INDÚSTRIA DE AVES, PEIXES E TERMOPROCESSADOS

##### 3.2.1 Avicultura brasileira

A produção de carne de frango desempenha papel estratégico na agroindústria brasileira, consolidando-se como um dos principais segmentos do setor de proteína animal. Em 2024, o Brasil alcançou a marca de 14,972 milhões de

toneladas produzidas, o que o posiciona como o terceiro maior produtor mundial, atrás apenas dos Estados Unidos e da China. O valor bruto dessa produção foi de aproximadamente R\$ 106 milhões, com 5,295 milhões de toneladas destinadas ao mercado externo, gerando US\$ 9,9 bilhões em receitas e exportações para 151 países. Com isso, o Brasil se mantém como o maior exportador global de carne de frango, sendo que 35,36% da produção nacional é destinada ao comércio internacional (ABPA, 2025).

Quanto às exportações, a maior parte corresponde a cortes de frango (74,45%), seguida pelo frango inteiro (20,22%), produtos salgados (2,94%) e pelos industrializados ou termoprocessados, que representam 2,38% do volume exportado, com destaque para os mercados do Reino Unido, da União Europeia e do Chile (ABPA, 2025).

Historicamente, a região Sul do Brasil destaca-se como uma das mais tradicionais na criação de aves, marcada pela forte atuação de cooperativas que desempenham papel fundamental na organização da cadeia produtiva e no apoio aos produtores. No cenário nacional, os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná se sobressaem na produção avícola, respondendo, respectivamente, por 11,52%, 13,98% e 39,99% do total produzido, sendo este último o principal polo do país, atendendo tanto ao mercado internacional quanto à demanda interna, cujo consumo per capita foi estimado em 45,5 kg/habitante (Barros; Junior, 2023).

À medida que a avicultura brasileira avança, o setor consolida-se como um dos pilares da economia nacional, exercendo expressiva relevância social e econômica. Estima-se que a cadeia produtiva da avicultura seja responsável, direta e indiretamente, por aproximadamente 4 milhões de empregos em todo o país, dos quais mais de 300 mil estão concentrados na indústria frigorífica. Tal representatividade evidencia não apenas a importância do setor para a geração de renda e oportunidades de trabalho, mas também seu papel estratégico no fortalecimento do agronegócio brasileiro e na manutenção da competitividade do país no cenário global (ABPA, 2025).

### 3.2.2 Aquicultura brasileira

Dessa forma, a realidade da agropecuária brasileira encontra-se em constante transformação, impulsionada por fatores como os avanços científicos e tecnológicos,

a dinâmica dos mercados consumidores e produtores e a ampliação das exportações. Nesse contexto, o fortalecimento de políticas públicas, aliado à implementação de novos conhecimentos e inovações tecnológicas, tem favorecido a expansão do setor, com destaque especial para a aquicultura, que desponta como uma das áreas mais promissoras no cenário agroindustrial nacional (PEIXE BR, 2025).

A piscicultura brasileira também apresenta crescimento expressivo e consolidado nos últimos anos, com destaque para a produção de tilápia, que representa um mercado muito promissor para o país se destacando como a atividade agropecuária que mais cresceu no mundo a partir do ano de 1970 (Pinto; Galvão, 2023)

Em 2024, o país produziu 662.230 toneladas dessa espécie, representando um aumento de 14,36% em relação ao ano anterior. A tilápia deteve cerca de 94% da participação nas exportações da piscicultura nacional, principalmente na forma de filés frescos ou congelados, peixes inteiros congelados e subprodutos. A produção concentrou-se majoritariamente nos estados do Paraná, São Paulo e Minas Gerais, posicionando o Brasil como o quarto maior produtor mundial da espécie, atrás apenas de China, Indonésia e Egito. Os principais destinos da tilápia brasileira foram Estados Unidos, Peru, Canadá, China e Japão, mercados que reconhecem a qualidade e a competitividade do produto nacional (PEIXE BR, 2025).

### 3.3 CONSUMO HÍDRICO E IMPACTOS AMBIENTAIS DA PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL

O agronegócio constitui uma das principais atividades econômicas no cenário mundial e, no caso brasileiro, apresenta-se como setor estratégico, especialmente em função do crescente volume de produção e exportação de produtos agropecuários. No entanto, esse avanço tem sido acompanhado pelo aumento significativo do consumo de água, recurso essencial em praticamente todas as etapas produtivas. A utilização inadequada desse recurso pode gerar impactos ambientais relevantes, incluindo a redução da disponibilidade e da qualidade da água, comprometendo não apenas a sustentabilidade dos sistemas produtivos, mas também a qualidade de vida das comunidades que dele dependem (Neto, 2024).

No caso específico da indústria frigorífica, o consumo de água assume dimensões expressivas, sendo apontado como um dos principais fatores de impacto

ambiental do setor (Liberatti, 2018). Em abatedouros de aves, por exemplo, estima-se uma demanda média de 20 a 30 litros de água por animal abatido, considerando-se todas as etapas do processo produtivo, desde a recepção e insensibilização, evisceração, até o resfriamento, corte, congelamento e expedição do produto. Além disso, o recurso é amplamente utilizado na higienização de equipamentos, em áreas de apoio à produção, em serviços administrativos e para o consumo humano em refeitórios, sanitários e vestiários (Fagnani, 2017)

Semelhante ao que ocorre no processamento da carne de frango, o processamento de tilápias demanda elevado volume de água, pois a utiliza em quase todas as etapas do processamento (depuração, insensibilização, abate, limpeza de superfícies, evisceração, filetagem) e processo de limpeza das plantas, durante e após a atividade industrial (Murakami, 2018). Em estudo conduzido por Feiden et al. (2022), indicou um consumo médio de 19,64 litros de água para o processamento de 1 kg de filé de tilápia, evidenciando a intensidade hídrica característica dessa atividade.

No processamento e abate de aves, o volume de efluente gerado está diretamente relacionado ao elevado consumo de água, sendo estimado que entre 80% e 95% da água utilizada nessas operações se converta em efluente industrial (Simadon, 2022). As etapas de recepção, abate e resfriamento — este último frequentemente realizado com o uso de água e gelo — concentram a maior parcela desse consumo. O efluente resultante caracteriza-se pela presença de sangue, gorduras, excrementos e vísceras, conferindo-lhe alta carga orgânica e significativa potencialidade poluidora. Diante dessa composição, torna-se imprescindível o emprego de sistemas adequados de tratamento, não apenas para mitigar impactos ambientais, mas também para garantir a biossegurança das operações (Rodrigues, 2023). A Tabela 1 apresenta características físico-químicas de efluente de diferentes abatedouros de aves.

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DE EFLUENTES BRUTOS DE ABATEDOURO DE AVES

<b>Parâmetros</b>	<b>Rosa (2019)</b>	<b>Castro et al. (2019)</b>	<b>Conrado (2023)</b>	<b>Rodrigues (2023)</b>
pH	6,32	7,3	5,5	6,17
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	8334,00	3835	3727	4098,28
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	5940,85	1788	580	2470,6
Sólidos totais (mg L <sup>-1</sup> )	3770,77	-	3012	1637,50
Óleos e graxas (mg L <sup>-1</sup> )	2511,71	1127	-	1197,50
Nitrogênio amoniacal (mg L <sup>-1</sup> )	-	730,6	1522	-
Turbidez (NTU)	1101,00	450	-	1475

Fonte: Adaptado de Rosa (2019), Castro et al. (2019), Conrado (2023) e Rodrigues (2023)

No processamento de pescado, incluem-se etapas como sangria, descamação, descabeçamento, evisceração e filetagem, entre outras, que resultam na geração de efluentes com elevada carga orgânica. Esses resíduos apresentam concentrações significativas de lipídios e proteínas provenientes do abate, o que contribui para valores elevados de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO). Além disso, destacam-se a presença de compostos nitrogenados e fósforo, que potencializam o risco de eutrofização dos corpos hídricos receptores, reforçando a necessidade de tratamentos adequados para mitigar seus impactos ambientais (Murakami, 2018).

A Tabela 2 apresenta características físico-químicas de efluente de diferentes abatedouros de peixes.

TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DE EFLUENTES BRUTOS DE ABATEDOURO DE PEIXES

<b>Parâmetros</b>	<b>Husam; Nassar (2019)</b>	<b>Mannacharaju et al. (2019)</b>	<b>Campos (2020)</b>	<b>Araújo (2023)</b>
pH	7,1	6,73	6,5	4,45
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	4502,5	3640	907	3350
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	2350	1840	455	-
Sólidos totais (mg L <sup>-1</sup> )	-	13175	845	1854
Óleos e graxas (mg L <sup>-1</sup> )	-	631	799	740
Nitrogênio amoniacal (mg L <sup>-1</sup> )	30	39	88	-
Turbidez (NTU)	-	-	459	-

Fonte: Adaptado de Husam; Nassar (2019), Mannacharaju et al., (2019), Campos (2020) e Araújo (2023)

A caracterização dos efluentes por meio de parâmetros físico-químicos e biológicos é fundamental, pois alterações nesses indicadores comprometem a qualidade da água e o cumprimento da legislação ambiental. O Potencial Hidrogeniônico (pH) influencia a solubilidade e a toxicidade de substâncias, enquanto cor e turbidez reduzem a penetração de luz, favorecendo a eutrofização. Sólidos suspensos ou sedimentáveis podem gerar lodos em decomposição anaeróbia, prejudicando a biodiversidade aquática. Já a DBO e a DQO refletem a carga orgânica dos efluentes, cujo excesso consome oxigênio dissolvido, provoca odores e ameaça a sobrevivência da fauna aquática (Silva; Serpa e Grando, 2021)

As indústrias de abate lançam seus efluentes em corpos hídricos, o que exige rigoroso controle para assegurar a disponibilidade e a qualidade da água às gerações futuras, reduzir os impactos ambientais e contribuir para a melhoria da qualidade de vida, especialmente nos grandes centros urbanos. Para tanto, órgãos governamentais estabelecem parâmetros de qualidade que regulam o lançamento desses efluentes no meio ambiente. Entre as alternativas viáveis para mitigar a geração e a carga poluidora desses resíduos, destaca-se a adoção de métodos e tecnologias voltados ao reúso da água, prática que, além de reduzir o consumo, pode melhorar a qualidade do efluente tratado (Souza; Vidotti; Oliveira Neto, 2008).

### 3.4 LEGISLAÇÃO PARA LANÇAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

No Brasil, a destinação e o tratamento de efluentes são regulados por legislações ambientais, como a Resolução CONAMA nº 430/2011, que estabelece condições e padrões de lançamento em corpos hídricos, principalmente pela exigência de monitorar limites de concentrações nos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos que irão determinar a necessidade de redução da taxa de aplicação/lançamento do efluente (Lima, 2024).

Para efluentes da indústria frigorífica de frango que contém alta concentração de carga orgânica e de nutrientes, os parâmetros de DBO e as concentrações de compostos fosfatados e nitrogenados são as variáveis mais difíceis de enquadramento na lei (SCHATZMANN, 2009) por exigirem grande redução de concentração no tratamento (Lemes, 2021).

A Tabela 4 apresenta os padrões de lançamento exigidos pela Resolução CONAMA 430/2011.

TABELA 3 - PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO CONAMA 430/2011

Parâmetros	Valores máximos permitidos
pH	$5 \leq \text{pH} \leq 9$
Temperatura	40 °C
Materiais sedimentáveis	1 mL L <sup>-1</sup>
Óleos minerais	20 mg L <sup>-1</sup>
Óleos vegetais e gorduras animais	50 mg L <sup>-1</sup>
Materiais flutuantes	0
DBO	Remoção de 60%
Arsênio total	0,5 mg L <sup>-1</sup>
Bário total	5 mg L <sup>-1</sup>
Boro total	5 mg L <sup>-1</sup>
Cádmio total	0,2 mg L <sup>-1</sup>
Chumbo total	0,5 mg L <sup>-1</sup>
Cianeto total	1 mg L <sup>-1</sup>
Cianeto livre	0,2 mg L <sup>-1</sup>
Cobre dissolvido	1 mg L <sup>-1</sup>
Cromo hexavalente	0,1 mg L <sup>-1</sup>
Cromo trivalente	1 mg L <sup>-1</sup>
Estanho total	4 mg L <sup>-1</sup>
Ferro dissolvido	15 mg L <sup>-1</sup>
Fluoreto total	10 mg L <sup>-1</sup>
Manganês dissolvido	1 mg L <sup>-1</sup>
Mercúrio total	0,01 mg L <sup>-1</sup>
Níquel total	2 mg L <sup>-1</sup>
Nitrogênio amoniacal total	20 mg L <sup>-1</sup>
Prata total	0,1 mg L <sup>-1</sup>
Selênio total	0,3 mg L <sup>-1</sup>
Sulfeto	1 mg L <sup>-1</sup>
Zinco total	5 mg L <sup>-1</sup>

Fonte: Brasil, (2011).

Contudo, cada estado brasileiro possui regulamentações específicas acerca do controle e monitoramento de efluentes. No Paraná, a responsabilidade é do Instituto Água e Terra (IAT), que, por meio da Portaria nº 256/2013, estabelece a obrigatoriedade da apresentação anual da Declaração de Carga Poluidora (DCP). Esse instrumento exige a coleta, medição e análise tanto do efluente tratado quanto do corpo hídrico receptor, assegurando o cumprimento da legislação vigente e

contribuindo para a proteção ambiental e para a preservação da qualidade de vida da comunidade (Simadon, 2021).

### 3.5 SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS

A seleção de um sistema de tratamento de efluentes requer uma análise criteriosa de requisitos técnicos, econômicos e ambientais. Entre os principais fatores a serem considerados destacam-se os custos de investimento e operação, que incluem a geração e destinação adequada de resíduos, a demanda por mão de obra especializada, o consumo energético, a realização de análises laboratoriais de monitoramento, a manutenção dos equipamentos e a necessidade de insumos químicos. Além disso, aspectos externos como as condições climáticas, a disponibilidade de área para implantação, a classe e capacidade de assimilação do corpo hídrico receptor, a conformidade com as normas legais vigentes, a direção predominante dos ventos, a proximidade de áreas residenciais, a disponibilidade de assistência técnica, a facilidade de controle operacional e a estabilidade geotécnica do terreno devem ser cuidadosamente avaliados (Franciozi, 2020).

Nesse contexto, a caracterização físico-química e biológica do efluente, associada à análise das condições locais, é essencial para evitar tanto o subdimensionamento quanto o superdimensionamento da estação de tratamento, assegurando eficiência operacional, viabilidade econômica e conformidade ambiental. De modo geral, os sistemas de tratamento de efluentes estruturam-se em três etapas progressivas — preliminar e primária, secundária e terciária — cada qual destinada à remoção de diferentes tipos de poluentes, garantindo que o efluente final atenda aos padrões legais estabelecidos (Metcalf; Eddy, 2016).

O tratamento preliminar tem por objetivo reter materiais grosseiros, flutuantes e minerais sedimentáveis, utilizando grades, desarenadores, caixas de retenção de óleo e gordura e peneiras (Von Sperling, 2014). Nessa fase, remove-se grande parte dos sólidos grosseiros, prevenindo tanto impactos estéticos e ambientais quanto danos mecânicos a equipamentos posteriores, como bombas, tubulações e agitadores (Pereira, 2023).

O tratamento primário, por sua vez, promove a remoção de matéria orgânica suspensa por processos físico-químicos, tais como decantação, flotação, coagulação e sedimentação (Von Sperling, 2014). Essa etapa pode atingir até 50% de remoção

de sólidos suspensos, entre 25 e 50% de DBO, 10 a 20% de nitrogênio orgânico e cerca de 10% de fósforo. Contudo, para a maioria das aplicações de reuso industrial, essa etapa é insuficiente para garantir a qualidade exigida (Liberatti, 2018).

O tratamento secundário diferencia-se por adotar processos biológicos voltados à degradação da matéria orgânica dissolvida, não removida nas etapas anteriores (Chiavelli, 2019). Para isso, utilizam-se sistemas como lagoas de estabilização, lodo biológico, reatores anaeróbios de alta eficiência e filtros biológicos (Von Sperling, 2014). Esse tratamento é amplamente aplicado em abatedouros, dado que a elevada carga de nutrientes e de matéria orgânica biodegradável favorece o desenvolvimento de microrganismos decompositores, essenciais ao processo (Nishimura, 2020).

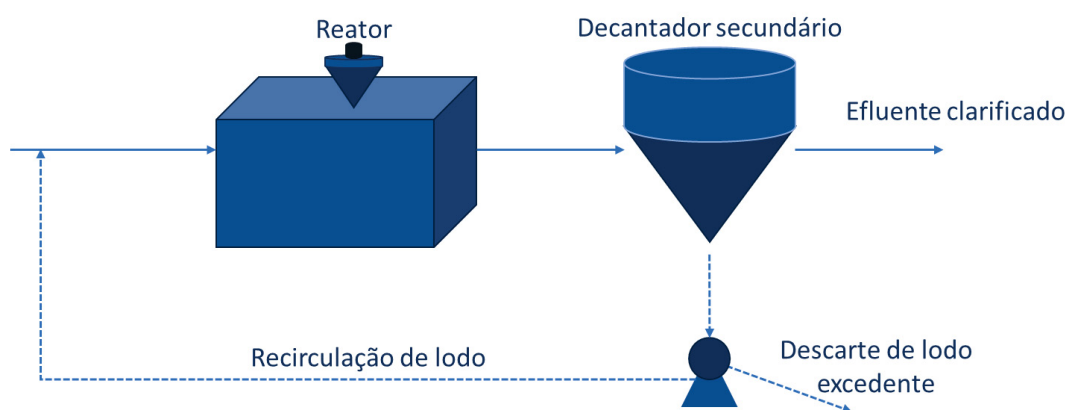
Por fim, o tratamento terciário é empregado quando se busca um efluente de elevada qualidade ou a remoção de contaminantes específicos não eliminados nas etapas anteriores. As tecnologias aplicadas incluem adsorção em carvão ativado, osmose inversa, eletrodialise, troca iônica, entre outras, permitindo atender padrões mais restritivos de qualidade da água (Von Sperling, 2014).

### 3.5.1 Lodo biológico

O sistema de lodos biológicos, concebido no Reino Unido por Ardern e Lockett em 1914, iniciou-se com operação semelhante aos atuais reatores em batelada, evoluindo posteriormente para o modelo de fluxo contínuo, que permanece como a configuração mais utilizada na atualidade. O sistema de lodos ativados remove de forma eficiente os poluentes e impurezas do esgoto ou efluente industrial, resultando em uma água tratada que atende — ou até supera — os padrões de qualidade exigidos pelas normas ambientais para lançamento em corpos d'água ou para reuso. O processo baseia-se em um tratamento biológico aeróbio, no qual a matéria orgânica e outros constituintes presentes no efluente são convertidos em gases e biomassa microbiana por meio da manutenção de alta concentração de microrganismos em suspensão, garantida por agitação e aeração contínuas. Embora eficiente, essa tecnologia exige elevado nível de mecanização, o que implica maior complexidade operacional e consumo significativo de energia elétrica, quando comparado a outros processos de tratamento (Metcalf & Eddy, 2013 e Von Sperling, 2016).

As principais unidades que compõem a etapa biológica desse sistema são o tanque de aeração (reator), o decantador secundário e a recirculação de lodo, conforme ilustrado na Figura 1. Na maioria das aplicações, o sistema de lodos ativados é integrado a etapas físicas e químicas, correspondentes ao tratamento preliminar e primário, voltadas à remoção de sólidos grosseiros e à redução inicial da carga orgânica. Complementarmente, pode-se incluir desinfecção e, em alguns casos, filtração, garantindo que o efluente tratado atenda aos padrões de qualidade estabelecidos pela legislação e aos requisitos de sua destinação final (Metcalf & Eddy, 2013).

FIGURA 1 - ESQUEMA DAS UNIDADES E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE LODOS ATIVADOS



Fonte: Adaptado de Von Sperling (2016).

No reator biológico do sistema de lodos ativados ocorrem as reações bioquímicas responsáveis pela remoção da matéria orgânica e, sob determinadas condições, também da matéria nitrogenada. A biomassa microbiana utiliza o substrato presente no esgoto bruto como fonte de energia e nutrientes para seu crescimento e metabolismo. Em seguida, o efluente segue para o decantador secundário, onde ocorre a sedimentação dos sólidos biológicos. Esse processo é facilitado pela capacidade de floculação das bactérias, que formam uma matriz gelatinosa, permitindo a separação eficiente da biomassa e a obtenção de um efluente clarificado. Os sólidos sedimentados são parcialmente recirculados ao reator, aumentando a concentração de microrganismos ativos e garantindo a elevada eficiência do sistema, enquanto o excesso de lodo é descartado para tratamento ou destinação final adequada (Von Sperling, 2016).

A eficiência do processo está diretamente associada ao tempo de retenção dos sólidos, também denominado idade do lodo, parâmetro que expressa o período médio em que a biomassa permanece no sistema. Idades de lodo mais elevadas proporcionam maior tempo para a degradação da matéria orgânica, resultando em efluentes de melhor qualidade. De modo geral, a idade do lodo é classificada em reduzidíssima, reduzida, intermediária e elevada, sendo inversamente proporcional à carga de Demanda Bioquímica de Oxigênio (Von Sperling, 2016). Ou seja, quanto maior a idade do lodo, menor a carga de DBO, conforme demonstrado na Tabela 4.

TABELA 4 - CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS EM FUNÇÃO DA IDADE DO LODO

<b>Idade do lodo</b>	<b>Carga de DBO</b>	<b>Faixa de idade do lodo</b>	<b>Denominação usual</b>
Reduzidíssima	Altíssima	< 3 dias	Aeração modificada
Reduzida	Alta	4 a 10 dias	Lodo biológico convencional
Intermediária	Intermediária	11 a 17 dias	-
Elevada	Baixa	18 a 30 dias	Aeração prolongada

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2016).

Idades do lodo demasiadamente baixas resultam na remoção acelerada dos microrganismos, impedindo o estabelecimento de populações essenciais, como as nitrificantes. Por outro lado, idades excessivamente altas favorecem o acúmulo de biomassa no tanque de aeração, comprometendo a transferência de oxigênio e sobrecarregando o decantador secundário, o que dificulta a sedimentação dos sólidos e reduz a qualidade e a eficiência do efluente tratado. Assim, o controle adequado da idade do lodo torna-se fundamental para equilibrar a biomassa do sistema, evitando tanto a deficiência quanto o excesso. Para isso, recomenda-se a retirada de uma quantidade de biomassa equivalente àquela gerada pela reprodução microbiana, configurando o chamado lodo biológico excedente, que deve ser conduzido às etapas subsequentes de tratamento (Von Sperling, 2016).

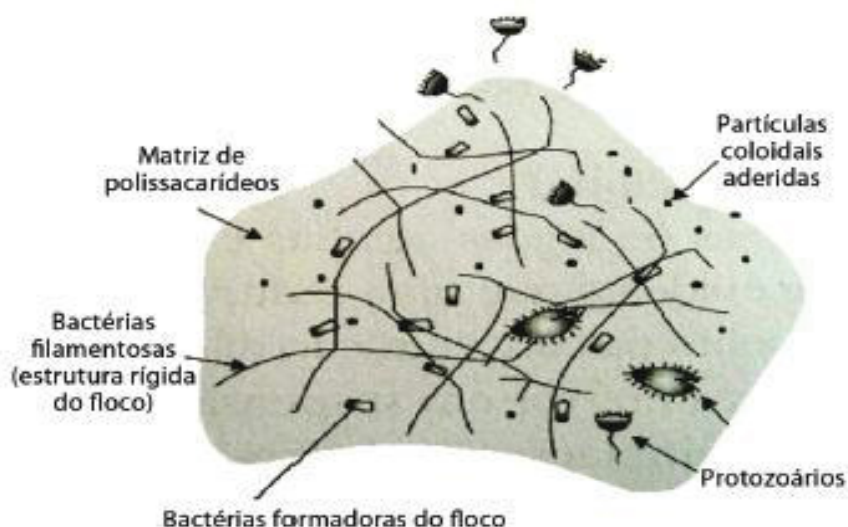
Portanto, o tempo médio de residência celular, também denominado idade do lodo, configura-se como um dos parâmetros operacionais mais relevantes do sistema de lodos ativados, exercendo influência direta sobre a morfologia dos flocos biológicos e, conseqüentemente, sobre a eficiência do processo de sedimentação (Oliveira, 2014). Nessa dinâmica, os microrganismos, que compõem cerca de 95% da biomassa ativa, constituem a base estrutural e funcional do sistema, sendo responsáveis pelos

processos metabólicos que promovem a degradação da matéria orgânica presente nos efluentes (Mauer, 2025).

### 3.5.2 Composição do lodo biológico

Os flocos biológicos do sistema de lodos ativados resultam da interação entre microrganismos, partículas inorgânicas e substâncias poliméricas extracelulares (EPS). Essa combinação dá origem a aglomerados com morfologia irregular, elevada porosidade, estrutura interconectada e composição interna heterogênea, características que favorecem tanto a sedimentação quanto a atividade biológica. As EPS exercem papel fundamental na coesão desses flocos, enquanto os microrganismos — em especial as bactérias filamentosas — contribuem diretamente para sua formação, atuando como uma espécie de suporte estrutural. Essas bactérias apresentam a capacidade de adsorver coloides, macromoléculas, íons e substâncias biologicamente ativas, funcionando, metaforicamente, como a “coluna cervical” dos flocos, assegurando sua estabilidade e eficiência nos processos de degradação da matéria orgânica (Oliveira, 2014). Na Figura 2 temos uma representação gráfica de um floco de lodo biológico.

FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO DO FLOCO DE LODO BIOLÓGICO



Fonte: Adaptado de Von Sperling (2016).

As células bacterianas correspondem a uma fração relativamente pequena do material orgânico presente nos flocos de lodo biológico, geralmente variando entre 5%

e 20%. Dessa forma, a maior parte da matéria orgânica — cerca de 80% a 95% — é constituída por material morto, o qual exerce papel fundamental nas propriedades químicas e coloidais dos flocos, influenciando sua estrutura e estabilidade. No ambiente do lodo biológico, as bactérias podem estar organizadas como células isoladas, micro colônias ou na forma de bactérias filamentosas, cada configuração desempenhando diferentes funções ecológicas (Nielsen; Nielsen, 2004).

O lodo biológico e as águas residuais são ambientes ricos em nutrientes que sustentam as atividades fisiológicas de diversos microrganismos, os quais podem secretar uma variedade de enzimas (Awasthi et al., 2023). Essas águas residuais também representam uma fonte potencial de microrganismos produtores de novos metabólitos. Além disso, esse ambiente contém compostos macromoleculares fundamentais para a formação de biofloculantes, como proteínas, ácidos nucleicos, polissacarídeos e celulose (Nkosi, 2021).

### 3.5.3 Microbiologia dos lodos ativados

Além das bactérias, os flocos biológicos configuram-se como verdadeiros microecossistemas, compostos também por fungos, protozoários e micrometazoários, que desempenham funções essenciais para o equilíbrio e a eficiência do processo de tratamento. Esses organismos contribuem para a manutenção da comunidade bacteriana e participam ativamente na regulação da demanda biológica de oxigênio. A diversidade dessa microfauna reflete diretamente na estabilidade do sistema de lodos ativados e na qualidade do efluente tratado (Bento, 2005). A Tabela 5 apresenta a classificação utilizada para agrupar os principais organismos presentes nos lodos ativados, acompanhada de uma breve descrição do papel desempenhado por cada grupo.

TABELA 5 - CLASSIFICAÇÃO UTILIZADA PARA AGRUPAR OS ORGANISMOS DA MICROFAUNA

Grupos	Classificação	Breve descrição
Ciliados	Ciliados predadores de flocos – CPF	Possuem a célula achatada dorsoventralmente e cílios modificados e agrupados na parte do corpo que fica em contato com o substrato. São vorazes predadores de bactérias.
	Ciliados livres nadantes – CLN	Possuem cílios distribuídos regularmente por toda a célula e nadam livremente entre os flocos. São predadores e carnívoros.
	Ciliados fixos – CF	Ficam unidos ao substrato por um pedúnculo, sendo algumas espécies, coloniais. Os cílios encontram-se na região anterior do corpo, próximo a cavidade oral.
Amebas	Tacamebas – TAMB	Possuem revestimento externo constituído por proteínas, sílica, calcário, ferro e etc.
	Amebas nuas - AMN	Não possuem forma definida, tem corpo mole.
Flagelados	Zooflagelados – ZFL ou FLG	São flagelados não pigmentados podendo ter um a vários flagelos. Ingerem matéria solida ou substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas.
Micrometazoários	Rotíferos, Nematóides, Anelídeos, Tardígrados - MTZ	São organismos pluricelulares de vários filos. Possuem lenta taxa de crescimento, sendo a maioria composta por predadores de bactérias e protozoários

Fonte: Adaptado de Bento (2005).

Por apresentarem elevada sensibilidade às variações operacionais, os organismos da microfauna dos lodos ativados respondem rapidamente às mudanças nas condições físico-químicas e ambientais do sistema. Dessa forma, constituem importantes bioindicadores, capazes de sinalizar tendências no desempenho do processo. Sua presença, abundância e diversidade podem refletir a eficiência da remoção da demanda bioquímica de oxigênio e de sólidos suspensos, bem como indicar aspectos operacionais cruciais, como a qualidade da sedimentação do lodo, o nível de aeração, a ocorrência de sobrecargas orgânicas, a presença de compostos tóxicos e até mesmo a efetividade da nitrificação (Bento, 2005).

### 3.5.4 Composição, características e métodos de secagem do lodo biológico

O lodo proveniente de sistemas de lodos ativados apresenta, em média, uma concentração de sólidos da ordem de 20% (Schulz, 2019). Além das células bacterianas, responsáveis pela atividade biológica do sistema, estima-se que entre 80% e 95% da matéria orgânica presente nos flocos seja constituída por diferentes tipos de compostos orgânicos, sendo as substâncias poliméricas extracelulares a fração predominante. Essas substâncias são formadas por polissacarídeos, proteínas, lipídios, ácidos nucleicos, substâncias húmicas e diversos heteropolímeros (Nielsen, 2004), exercendo papel fundamental na coesão e estabilidade estrutural dos flocos. De modo geral, as proteínas representam a maior fração da matéria orgânica volátil presente no lodo, conforme evidenciado na Tabela 6.

TABELA 6 - COMPOSIÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO FLOCO DE LODO

<b>Composição</b>	<b>% dos sólidos voláteis</b>
Proteínas	46 – 52%
Compostos húmicos	18 – 23%
Carboidratos	17 %

Fonte: Frølund et al., (1996).

Dependendo da finalidade, a secagem do lodo é considerada uma alternativa eficiente, versátil e estratégica para a destinação final de resíduos de estações de tratamento de esgoto, pois permite reduzir significativamente o volume e o peso do lodo por meio da evaporação de sua umidade (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2007).

Entre os métodos empregados, destacam-se os processos naturais, amplamente utilizados em regiões de clima quente, como o Brasil. Nesses casos, utilizam-se leitos e lagoas de secagem, que apresentam operação simples e baixo custo, embora demandem áreas extensas em função de seu princípio de funcionamento, baseado em processos físicos de percolação e evaporação. Por outro lado, os sistemas mecânicos, embora menos usuais devido ao elevado custo de implantação, manutenção e necessidade de operação mais especializada, possibilitam o tratamento em áreas reduzidas (Schulz, 2019). Na tabela a seguir está representado um comparativo entre os métodos naturais e mecânicos de secagem de lodo.

TABELA 7 - COMPARATIVO ENTRE MÉTODOS NATURAIS E MECÂNICOS DE SECAGEM DE LODO

<b>Aspectos</b>	<b>Processos Naturais (Leitos e Lagoas de Secagem)</b>	<b>Processos Mecânicos (Centrifugação e Adensamento)</b>
Princípio de funcionamento	Baseados em processos físicos de percolação e evaporação.	Separação físico-mecânica da água por força centrífuga ou adensamento.
Custo de implantação e operação	Baixo custo, devido à simplicidade operacional.	Elevado custo de implantação, manutenção e operação.
Área necessária	Demanda grandes áreas, dificultando aplicação em centros urbanos.	Requer áreas reduzidas, adequado a espaços limitados.
Nível de operação	Operação simples, exige pouca especialização técnica.	Operação mais complexa, requer mão de obra especializada.
Tempo de secagem	Mais demorado, dependente das condições climáticas.	Mais rápido e independente de variações climáticas.
Adequação climática	Mais eficientes em regiões quentes e secas, como no Brasil.	Funciona em diferentes condições climáticas.
Impactos ambientais	Menor emissão de ruídos, mas sujeito a odores e vetores.	Pode gerar ruídos e odores; demanda energia elétrica elevada.
Destinação do lodo	Pode ser utilizado em reúso agrícola ou disposto em aterros.	Pode ser destinado a reúso, incineração ou aproveitamento energético.

Fonte: Adaptado de Andreoli; Von Sperling; Fernandes (2007) e Schulz (2019).

Os processos de secagem resultam em compostos que podem ser aproveitados como combustível em caldeiras, fornos de cimento e aquecedores industriais, ou destinados ao reúso agrícola. Dentre as alternativas disponíveis, a reciclagem apresenta-se como a forma mais sustentável de aproveitamento desse resíduo, além de implicar em menor custo quando comparada a outras formas de disposição (Andreoli; Von Sperling; Fernandes, 2007).

### 3.6 POTENCIAL DE REAPROVEITAMENTO DO LODO BIOLÓGICO GERADO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO

O reaproveitamento do lodo biológico gerado em estações de tratamento de efluentes tem se consolidado como uma alternativa estratégica para a gestão sustentável dos resíduos no setor agroindustrial. Esse material, resultante

principalmente de sistemas de lodos ativados, apresenta elevada concentração de matéria orgânica, nutrientes essenciais e biomassa microbiana ativa, características que o tornam um recurso potencial para diferentes formas de valorização, como a produção de bioenergia, a recuperação de nutrientes e a aplicação agrícola. Além de reduzir o impacto ambiental associado ao descarte inadequado, a reutilização do lodo favorece a economia circular, ao transformar um passivo ambiental em insumo produtivo. Contudo, sua implementação em larga escala exige a consideração de aspectos técnicos, econômicos, legais e sociais, de modo a garantir a viabilidade e a segurança do processo.

### 3.6.1 Principais métodos de valorização (bioenergia, agricultura, biorremediação)

Um estudo realizado por Lins e Lima (2022) investigou a reutilização do lodo proveniente do sistema de tratamento de esgoto da cidade de Igaci, no estado do Alagoas. A cidade conta com um sistema de tratamento por lodos ativados e secagem natural através de leitos de secagem. A proposta do estudo consistiu em viabilizar a aplicação do lodo na área de agricultura, avaliando o seu valor nutricional, e calculando a dosagem necessária desse biossólido para os principais tipos de cultura existente no município de Igaci.

O estudo demonstrou que a aplicação do lodo de esgoto na agricultura constitui uma alternativa ambientalmente adequada e economicamente vantajosa, ao possibilitar seu uso como adubo por agricultores de Igaci. As análises realizadas no inverno e no verão indicaram teores significativos de nitrogênio (2,49% e 2%), conferindo ao biossólido elevada fertilidade e menor necessidade de dosagem em comparação a esterco animal e adubos verdes. Com os resultados obtidos, foi desenvolvido um banco de dados para orientar a aplicação em culturas como abóbora, algodão, banana, caju, feijão, fumo, manga e milho. Além de reduzir a destinação a aterros, o aproveitamento agrícola do lodo promove a produção de alimentos mais saudáveis e livres de pesticidas químicos. Entretanto, para garantir a qualidade do adubo e a segurança socioambiental, torna-se necessário acompanhamento técnico especializado para monitorar a composição físico-química e microbiológica do biossólido e assegurar sua aplicação adequada (Lins e Lima 2022).

Já o estudo realizado por Schulz (2019) teve como objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica da utilização de lodo biológico de estação de

tratamento de efluentes de uma indústria de soro de leite, como fonte de energia para possível queima em caldeira. Para isso, fizeram a coleta do lodo oriundo de uma planta de tratamento de efluentes, do descarte de uma lagoa aerada de um sistema de lodos ativados, removido do fundo dos decantadores secundários, e posteriormente passaram por adensamento em tanques e desidratados em decanter centrífugo.

A proposta envolveu um blend de cavaco/lodo em uma proporção de 9:1, que se mostrou bastante eficiente e proporcionando economias tanto com a menor queima de cavaco quanto com a não destinação do lodo, sendo uma redução de 704,16 kg do consumo diário de cavaco, gerando uma economia de R\$ 105,62 diariamente. Com a nova destinação do lodo, também será possível uma economia diária no valor de R\$ 1.205,73.

O lodo proveniente da lagoa aerada do sistema de tratamento de efluentes da agroindústria demonstrou viabilidade técnica e econômica para utilização na formação de um blend energético com cavaco de lenha, destinado à queima em caldeira, sem a necessidade de tratamento prévio. Observou-se, contudo, que a aplicação de um processo de secagem no lodo potencializa ainda mais essa viabilidade, ampliando a economia para a agroindústria em razão da redução do volume e da umidade do material. Em ambos os cenários analisados, a principal contribuição para a viabilidade não esteve diretamente associada à queima do lodo, mas sim à alteração de sua destinação final, que tradicionalmente representa o maior custo para a indústria. Dessa forma, os objetivos estabelecidos neste estudo foram plenamente atendidos (Schulz, 2019).

Já o trabalho da pesquisadora Oda (2017), teve como objetivo principal a produção de carvão ativado a partir de lodos biológicos gerados em estações de tratamento de efluentes de indústrias têxtil e de papel reciclado, avaliando sua capacidade de adsorção por meio da remoção do corante azul de metileno. Para atingir esse propósito, foram estabelecidos objetivos específicos que compreenderam: a caracterização dos lodos utilizados como materiais precursores; a realização dos processos de carbonização e ativação; a caracterização físico-química dos adsorventes obtidos; a análise da influência dos teores de matéria orgânica na eficiência dos adsorventes; a avaliação da capacidade adsorptiva por meio de ensaios com o corante azul de metileno; e, por fim, a comparação dos resultados obtidos com os de um carvão ativado comercial.

O estudo mostrou que o lodo biológico proveniente da indústria têxtil se mostrou um material precursor promissor para a produção de carvão ativado, apresentando potencial para aplicação na adsorção de contaminantes. Contudo, o processo ainda enfrenta desafios técnicos e ambientais, especialmente quanto ao tratamento ou reutilização dos efluentes gerados pelo agente ativante e à necessidade de avaliar a regeneração do carvão ativado para viabilizar seu reuso. Além disso, destaca-se que as características do carvão ativado variam de acordo com as particularidades do lodo de cada indústria, sendo necessária a avaliação em efluentes reais para comprovar sua eficácia em condições mais complexas (Oda 2017).

A reutilização do lodo como biomassa para queima em caldeiras tem se mostrado uma alternativa eficiente e sustentável, principalmente frente aos elevados custos de destinação em aterros ou processos de compostagem. Um estudo de caso realizado por Machado (2021) em uma indústria alimentícia em Uberlândia demonstrou a viabilidade técnica e econômica dessa prática, evidenciando benefícios tanto ambientais quanto financeiros. Além de reduzir os impactos causados pela disposição inadequada do resíduo, a proposta possibilitou ganhos expressivos com a geração de energia a partir do reaproveitamento do lodo.

O estudo demonstrou a viabilidade técnica e econômica, os resultados apontaram uma redução de 23,7% no consumo de cavaco e uma economia mensal estimada em R\$ 27.500,00. Do ponto de vista financeiro, o projeto apresentou indicadores favoráveis, como payback simples de 34 meses. Além disso, a iniciativa contribuiu para a diminuição do descarte inadequado em aterros, redução de riscos ambientais no transporte e melhor aproveitamento de resíduos, configurando-se como uma alternativa sustentável e estratégica para a gestão do lodo industrial (Machado, 2021).

Um estudo semelhante, desenvolvido por Klein (2021) analisou a viabilidade da reutilização do lodo proveniente da estação de tratamento de efluentes de uma indústria de laticínios da Serra Gaúcha, com o objetivo de reduzir o volume destinado a aterros e os custos associados ao seu manejo. O trabalho caracterizou o lodo seco quanto à umidade, teor de cinzas, voláteis, carbono fixo, acidez e poder calorífico, comparando seus resultados com os da madeira, já utilizada como biomassa na caldeira da indústria. Apesar do elevado teor de umidade, superior a 85%, e do baixo poder calorífico, os resultados indicaram que a mistura do lodo com lenha contribui para a diminuição do volume de resíduos e dos custos de transporte e disposição final,

ainda que a combustão apresente limitações, como a maior formação de cinzas e riscos de corrosão na caldeira.

Do ponto de vista econômico, a instalação de um secador rotativo demonstrou retorno positivo, sendo considerada uma alternativa viável a médio prazo, enquanto do ponto de vista ambiental, a proposta favoreceu a redução dos impactos associados ao descarte inadequado. O estudo também destacou possibilidades futuras de aproveitamento do lodo em leitos de secagem, uso agrícola ou no setor cerâmico, reforçando seu potencial como recurso alternativo em uma gestão de resíduos mais sustentável (Klein, 2021).

### 3.6.2 Uso da biomassa residual para geração de energia

A biomassa constitui-se como um recurso energético renovável proveniente de materiais orgânicos de origem animal ou vegetal, podendo ser encontrada tanto em sua forma natural quanto gerada por atividades humanas, como resíduos agrícolas, industriais e urbanos. Sua utilização como insumo energético destaca-se pela versatilidade, uma vez que os processos de conversão possibilitam a obtenção de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, o que lhe confere uma vantagem significativa frente a outras matrizes energéticas. Essa flexibilidade tecnológica permite sua adaptação a diferentes demandas energéticas e contextos produtivos, reforçando seu papel estratégico na diversificação da matriz energética e na promoção da sustentabilidade (Ferreira et al., 2018).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), a oferta interna de energia no Brasil encontra-se atualmente equilibrada entre fontes renováveis e não renováveis, cada uma representando aproximadamente 50% da matriz energética. Entre as fontes renováveis de maior relevância destacam-se a biomassa da cana-de-açúcar, a energia hidráulica, a lenha e o carvão vegetal, além do licor preto oriundo da indústria de papel e celulose. Esse perfil demonstra a importância da biomassa e de outras fontes sustentáveis na composição da matriz energética nacional (EPE, 2024).

A transformação da biomassa possibilita a geração de diferentes formas de energia, entre as quais se destacam a térmica, a elétrica e a mecânica. A energia térmica pode ser obtida por meio do sistema de combustão direta, amplamente utilizado em processos como a cocção de alimentos, o aquecimento e a secagem,

sendo o vapor resultante também aproveitado para a produção de eletricidade. A energia elétrica, por sua vez, pode ser gerada a partir da conversão de biomassa proveniente de culturas energéticas e de resíduos industriais, configurando uma alternativa sustentável às fontes convencionais. Já a energia mecânica é viabilizada pelo uso de biocombustíveis, capazes de substituir, de forma parcial ou total, os combustíveis fósseis, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para a redução das emissões de gases de efeito estufa (Franciozi, 2020).

A participação das fontes renováveis atingiu, em 2024, um patamar histórico de 50%, nível não observado desde 1990. Esse resultado está associado ao aumento expressivo da geração a partir de biomassa, energia eólica e solar, bem como à redução do consumo de petróleo e seus derivados. Observa-se, ainda, a estabilidade na participação da energia hidráulica e dos derivados da cana, ao passo que fontes fósseis como gás natural, carvão mineral e coque apresentaram queda, evidenciando os avanços da transição energética brasileira (EPE, 2024).

A combustão da biomassa é amplamente utilizada para geração de calor, produzindo como principais subprodutos o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e o vapor d'água. Sua eficiência depende do elevado teor de carbono fixo, material volátil e poder calorífico superior, que favorecem a liberação de energia. Por outro lado, concentrações elevadas de nitrogênio e enxofre no combustível aumentam as emissões de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), associados a impactos ambientais como chuva ácida e à degradação da qualidade do ar. Assim, a caracterização química da biomassa é essencial para garantir eficiência energética e reduzir efeitos ambientais adversos (Machado, 2021).

A recuperação desses resíduos permite fechar o ciclo da cadeia de suprimento de biomassa. Em comparação com o uso de culturas energéticas, a recuperação de energia a partir de biomassa residual pode ser considerada uma abordagem muito mais sustentável sob todos os aspectos (Casau, 2021).

### 3.6.3 Análise imediata

A análise imediata da biomassa constitui um parâmetro fundamental para avaliar seu potencial energético, pois permite identificar a proporção de seus principais componentes: materiais voláteis (MV), carbono fixo (F), cinzas (A) e umidade (W). Os materiais voláteis representam a fração mais facilmente inflamável, enquanto o

carbono fixo corresponde ao resíduo sólido resultante da decomposição desses voláteis, responsável pela manutenção da combustão. Já as cinzas indicam a quantidade de material inorgânico presente, cujo acúmulo pode comprometer a eficiência do processo, e a umidade reflete a quantidade de água livre, diretamente relacionada ao desempenho energético do combustível (Ponte, 2017).

De acordo com Protásio (2014), o conhecimento da composição química imediata da biomassa é fundamental para estimar a eficiência da combustão, assegurando sua aplicação adequada em processos como geração de calor, vapor, eletricidade e até na cocção de alimentos.

Em 2025, não há uma norma brasileira específica — como uma NBR — que cubra a análise imediata em resíduos de estações de tratamento de efluentes (lodos), que inclui determinação de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo. As normas ABNT existentes tratam da classificação de resíduos (como a NBR 10004, que define tipos de resíduos sólidos), mas não de métodos analíticos para composição química ou energética desses materiais.

Embora existam normas específicas para determinados materiais, alguns estudos adotam adaptações dessas metodologias para matrizes semelhantes. A NBR 8112 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986), por exemplo, estabelece procedimentos para a determinação de parâmetros em carvão vegetal e, apesar de estar atualmente cancelada, ainda é amplamente utilizada como referência. De forma semelhante, a ASTM D1762-84 (American Society for Testing and Materials, 2013) define métodos para análise de carvão vegetal, enquanto a ISO 17225-2:2021 (International Organization for Standardization, 2021) é direcionada à caracterização de pellets e briquetes de biomassa.

#### 3.6.4 Poder calorífico superior

O poder calorífico superior (PCS) refere-se à quantidade de calor gerado pela combustão completa de uma unidade de volume ou massa do combustível, levando em consideração as 19 condições de temperatura e pressão de referência, e também incluindo o calor latente de vaporização de água resultante (Silva, 2023).

Para um bom rendimento térmico na combustão, o combustível deve possuir uma elevada quantidade de carbono fixo e materiais voláteis, além de alto poder

calorífico. Quanto maior o teor de carbono e hidrogênio, melhor será a eficiência combustão na liberação de energia (Machado, 2021)

A Tabela 8 apresenta os valores de poder calorífico superior para diferentes tipos de biomassa encontrados na literatura

TABELA 8 - PODER CALORÍFICO SUPERIOR MÉDIO DE BIOMASSA ENCONTRADAS NA LITERATURA.

Biomassa	Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	Referência
Bagaço de cana em briquete	14,5	Arauterm (2008)
Carvão mineral	23 a 28	Demirbas (2004)
Eucalipto	19,4	Lora e Nascimento (2004)
Madeira de descarte	13	Arauterm (2008)
Madeiras nacionais	19,615	Quirino et al. (2005)
Madeira seca	17,50	Wang et al. (2013)
Lodo de tratamento aeróbio	22,19	Pasquini (2014)
Lodo digerido anaeróbio	12,79	Andreoli (2001)

Fonte: Adaptado de Machado (2021).

### 3.7 ESTUDO PRELIMINAR DA PRODUÇÃO E ATIVIDADE ENZIMÁTICA

#### 3.7.1 Proteases

As proteases constituem um grupo amplo e diversificado de enzimas hidrolíticas responsáveis pela catalisação da hidrólise de ligações peptídicas presentes em proteínas e polipeptídeos. Representam cerca de 60% das enzimas utilizadas na indústria, sendo classificadas com base no sítio de ação, na estrutura do sítio ativo e nos mecanismos específicos de reação (Elias, 2023; Andrade, 2022).

Essas enzimas são divididas em dois grupos principais: exopeptidases e endopeptidases. As exopeptidases clivam ligações peptídicas nas extremidades N- ou C-terminais das cadeias polipeptídicas, sendo classificadas como aminopeptidases ou carboxipeptidases, respectivamente. Já as endopeptidases atuam preferencialmente nas regiões internas das cadeias, apresentando menor atividade próximo às extremidades (Andrade, 2022).

No setor industrial, as proteases possuem ampla aplicação, especialmente na indústria alimentícia. No setor cárneo, são utilizadas para o amaciamento de carnes; na panificação, atuam na degradação do glúten, modificando as propriedades da

massa; e, nos laticínios, participam da coagulação do leite para a produção de queijos, entre outras aplicações (Tomaz, 2023).

Em relação à produção microbiana, diversos gêneros são reconhecidos como importantes produtores de proteases, como *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus* e *Bacillus*. Espécies como *B. subtilis*, *B. licheniformis*, *B. pumilus*, *A. niger* e *A. oryzae* são amplamente utilizadas, destacando-se pela secreção de proteases extracelulares em meios de cultura, sendo aplicadas tradicionalmente em processos fermentativos (Elias, 2023).

### 3.7.2 Amilases

As amilases são enzimas pertencentes à família  $\alpha/\beta$ -hidrolase, responsáveis por hidrolisar as ligações glicosídicas  $\alpha$ -1,4 presentes no amido, liberando glicose, maltose e dextrinas (Geragei; Rodrigues, 2023; Santiago et al., 2023). Essas enzimas são classificadas em três principais grupos:  $\alpha$ -amilase,  $\beta$ -amilase e glucoamilase, sendo a  $\alpha$ -amilase a mais relevante devido ao seu papel essencial na conversão do amido em compostos de baixa massa molecular, que podem servir de substrato para outras enzimas do mesmo grupo (Bernardes et al., 2014).

No cenário industrial, as amilases representam aproximadamente 25% da produção mundial de enzimas, ocupando a segunda posição em importância, atrás apenas das proteases (Santiago et al., 2023). Sua aplicação é ampla, abrangendo setores como panificação, fabricação de cerveja, produção de xaropes de amido, sucos de frutas, ração animal e indústria têxtil, onde contribuem, por exemplo, para a remoção de goma de tecidos.

A produção de amilases pode ocorrer em diferentes organismos, incluindo animais, fungos e bactérias, sendo as fontes microbianas as mais exploradas industrialmente. Microrganismos como *Bacillus spp.*, *Lactobacillus*, *Pseudomonas spp.*, *Proteus*, *Escherichia* e *Streptomyces spp.* destacam-se pela capacidade de produzir essas enzimas de forma eficiente, utilizando substratos de baixo custo e permitindo produção em larga escala (Silva, 2023).

### 3.7.3 Celulases

As celulases são enzimas que compõem um complexo responsável pela degradação de materiais celulósicos, promovendo a hidrólise da celulose e a liberação de açúcares fermentescíveis, aspecto que desperta grande interesse industrial (Rodrigues; D'Amico; Gerage, 2023). Essas enzimas são classificadas conforme o local de ação no substrato, dividindo-se em três principais grupos: **(a)** endoglucanases, que clivam ligações internas da fibra celulósica; **(b)** exoglucanases, que atuam nas extremidades das cadeias de celulose; e **(c)**  $\beta$ -glicosidases, responsáveis por hidrolisar oligossacarídeos solúveis em glicose (Subissay, 2022).

A produção de celulases ocorre por uma ampla diversidade de microrganismos durante o crescimento em substratos celulósicos, sendo as fontes industriais predominantemente microbianas, especialmente de fungos e bactérias. Entre os melhores produtores destacam-se espécies dos gêneros *Trichoderma*, *Aspergillus* e *Penicillium* (Andrade, 2022).

Essas enzimas apresentam vasta aplicação industrial, incluindo a produção de biocombustíveis, processamento de amido, fabricação de rações animais, fermentação alcoólica de grãos, produção de cerveja e malte, extração de sucos, indústria têxtil e processos de papel e celulose (Silva; Oliveira; Porto, 2021; Nascimento, 2024). O estudo das celulases constitui um campo de grande relevância para a bioquímica e a biotecnologia, dado o seu potencial em processos sustentáveis e inovadores.

### 3.7.4 Lipases

Lipases (triacilglicerol acilhidrolases, EC 3.1.1.3) são enzimas lipolíticas pertencentes ao grupo das serina hidrolases, responsáveis por catalisar a hidrólise das ligações éster-carboxílicas dos triacilgliceróis (TAG), com a liberação de ácidos graxos livres, diglicerídeos (DAG), monoglicerídeos (MAG) e glicerol sendo consideradas um dos maiores grupos de enzimas (Salgado, Santos e Vanetti, 2022).

Devido à versatilidade das reações catalisadas por lipases, elas são consideradas biocatalisadores biotecnologicamente importantes, tornando-se alternativas verdes aos métodos químicos, fornecendo ferramentas seguras e inestimáveis para transformações industriais para sintetizar materiais naturais ou

sintéticos com menor consumo de energia em condições moderadas de reação (Salgado, Santos e Vanetti, 2022)

Lipases de origem microbiana estão atualmente recebendo crescente atenção para aplicação industrial, pois os microrganismos crescem rapidamente e são facilmente manipulados geneticamente. Além disso, elas oferecem diversas vantagens, como catálise de diversas reações, alta especificidade, altos rendimentos, baixo consumo de energia e redução do tempo de processamento e dos custos de produção (Salgado, Santos e Vanetti, 2022).

As lipases microbianas apresentam potencial para o tratamento de águas residuais ricas em lipídios, oferecendo uma alternativa sustentável aos métodos físico-químicos, que são onerosos, ambientalmente inadequados e podem gerar poluição secundária. O acúmulo excessivo de lipídios nesses efluentes provoca sérios impactos ambientais, como entupimento de tubulações e formação de camadas oleosas que dificultam a penetração de oxigênio e luz, comprometendo a vida aquática. Apesar de promissora, a aplicação dessas enzimas na biorremediação ainda é pouco explorada (Nimkande; Bafana, 2022).

As bactérias produtoras de lipases são amplamente distribuídas no ambiente e, em sua maioria, não apresentam patogenicidade, não representando riscos significativos ao meio ambiente ou à saúde humana. Dentre os gêneros mais proeminentes na produção dessa enzima, destacam-se *Bacillus* e *Pseudomonas*, frequentemente citados na literatura. Lipases termotolerantes, por sua vez, têm sido isoladas de bactérias termofílicas do gênero *Bacillus*, que apresenta grande destaque na produção de lipases (Nimkande; Bafana, 2022).

As lipases possuem ampla aplicabilidade industrial, sendo amplamente empregadas no setor alimentício para a produção de alimentos assados, sucos e produtos fermentados. Além disso, essas enzimas apresentam papel fundamental em indústrias de limpeza, processamento de couro, cosméticos, papel e detergentes. Seu potencial também se estende a áreas tecnológicas e ambientais, incluindo o desenvolvimento de biossensores, produção de biodiesel, aplicações biomédicas, formulação de pesticidas e processos de biorremediação (Silva, 2023).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 LOCAL DO ESTUDO

O presente estudo foi conduzido no Laboratório de Química Ambiental da Universidade Federal do Paraná – Setor Palotina, utilizando como matriz o lodo proveniente de um complexo agroindustrial localizado na região oeste do Paraná. O referido complexo é composto por um abatedouro de aves, um abatedouro de peixes e uma indústria de termoprocessados, pertencentes a uma cooperativa de grande porte. A unidade apresenta elevada capacidade produtiva, processando aproximadamente 650 mil aves por dia, além do beneficiamento de cerca de 200 toneladas de carne de frango e 190 mil tilápias diariamente. A produção atende tanto ao mercado interno quanto ao externo, com a comercialização de mais de 450 produtos in natura e termoprocessados, abastecendo 17 estados brasileiros e exportando para mais de 150 países, correspondendo a 67% do volume total comercializado. Essa expressiva escala de produção ressalta a relevância do estudo, uma vez que o tratamento adequado dos efluentes gerados por empreendimento desse porte é fundamental para a mitigação de impactos ambientais e para a promoção da sustentabilidade no setor agroindustrial.

### 4.2 SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES DA EMPRESA

A estação de tratamento de efluentes do complexo agroindustrial em estudo recebe as águas residuárias provenientes do abatedouro de aves, abatedouro de peixes e da indústria de termoprocessados.

O sistema inicia-se com o tratamento preliminar e primário, no qual peneiras rotativas promovem a retenção de sólidos grosseiros, enquanto o tanque de equalização assegura a homogeneização da carga orgânica e a regularização da vazão afluente. Em seguida, o efluente é submetido à flotação físico-química, responsável pela remoção de sólidos suspensos, óleos e graxas por meio da formação de microbolhas de ar associadas ao uso de coagulantes e floculantes.

O efluente clarificado segue, por gravidade, para o tratamento biológico, constituído por três lagoas anaeróbias, responsáveis pela degradação parcial da matéria orgânica por via fermentativa, seguidas de uma lagoa anóxica, destinada à



contínuo. As coletas foram conduzidas por profissionais da própria empresa, devidamente responsáveis pelo acompanhamento e manejo do sistema de tratamento de efluentes, assegurando a padronização do procedimento e a representatividade das amostras. O ponto de coleta foi estabelecido na saída do decantador secundário, unidade responsável pela sedimentação da biomassa gerada no processo de lodos ativados. A frequência estabelecida para a coleta foi de uma amostra por mês, sendo todas as análises realizadas em triplicata.

Nesse estágio, o lodo apresenta duas possíveis destinações: parte é recirculada ao reator biológico, a fim de manter a concentração de sólidos suspensos voláteis necessária para a estabilidade do processo, enquanto o excedente é encaminhado para armazenamento e, posteriormente, retirado por empresa terceirizada especializada em seu transporte e destinação final. Essa estratégia garante o equilíbrio operacional do sistema, além de atender às exigências ambientais quanto ao manejo adequado de resíduos provenientes do tratamento de efluentes.

#### 4.4 POTENCIAL ENERGÉTICO DO LODO GERADO

##### 4.4.1 Análise imediata

Considerando a ausência de normas específicas para o tipo de resíduo avaliado neste estudo, optou-se por aplicar a metodologia utilizada por Franciozi (2020) que adaptou a metodologia utilizada por Sánchez (2010), ao estudar o uso de diferentes coagulantes no tratamento de efluente de abatedouro bovino e avaliou o potencial energético do lodo gerado por meio da determinação da composição química imediata — incluindo teores de umidade, materiais voláteis, cinzas e percentual de carbono fixo.

##### 4.4.2 Teor de umidade

Para o processo de secagem, o lodo foi disposto em bandejas de aço inoxidável previamente limpas, preparadas e pesadas. Em seguida, as amostras foram inseridas em estufa de circulação de ar forçado Solab, modelo SL-102 e mantidas a 105 °C por 24 h, ou até atingirem massa constante. Após o término da secagem, as amostras foram pesadas em balança analítica Shimadzu, modelo AU220

para registro da massa final. O material seco foi, então, acondicionado em frascos plásticos devidamente identificados e armazenado para análises subsequentes.

O teor de umidade da amostra foi calculado a partir da diferença entre a massa da amostra úmida e a massa da amostra seca, em relação à massa úmida, conforme expressa na Equação 1:

$$\% \text{ Umidade} = \left( \frac{M_{úmida} - M_{seca}}{M_{úmida}} \right) \times 100\%$$

Eq. 1

Em que:

$M_{úmida}$  representa a massa da amostra úmida (g)

$M_{seca}$  a massa da amostra após secagem (g).

De forma complementar, o teor de sólidos foi obtido pela razão entre a massa da amostra seca e a massa da amostra úmida, multiplicada por 100, conforme demonstrado na Equação 2:

$$\% \text{ Sólidos} = \left( \frac{M_{seca}}{M_{úmida}} \right) \times 100\%$$

Eq.2

Assim, o teor de sólidos corresponde à fração remanescente após a remoção da água da amostra, expressa em percentual.

#### 4.4.3 Teor de materiais voláteis

O teor de material volátil foi determinado utilizando uma mufla da marca LABOR, modelo SP-1200, previamente aquecida a  $850 \pm 20$  °C. Aproximadamente 1 g de lodo preparado e seco ( $M_{inicial}$ ) foi colocado em cadinhos tampados, que permaneceram na mufla por 6 minutos. Em seguida, os cadinhos, ainda tampados, foram retirados e transferidos para um dessecador para resfriamento por aproximadamente 1 hora. Após esse período, a massa residual da amostra ( $M_{residual}$ ) foi medida em balança analítica. O teor de material volátil foi calculado conforme a Equação 3.

$$\% \text{ Material volátil} = \left( \frac{M_{\text{inicial}} - M_{\text{residual}}}{M_{\text{inicial}}} \right) \times 100\% \quad \text{Eq. 3}$$

Em que:

$M_{\text{inicial}}$  = massa inicial da amostra seca (g)

$M_{\text{residual}}$  = massa final da amostra pós aquecimento (g)

#### 4.4.4 Teor de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas, utilizou-se a mesma mufla empregada na análise do teor de material volátil, submetendo a amostra a um programa de aquecimento controlado. Inicialmente, a mufla foi aquecida de 0 a 500 °C durante 1 hora, com uma rampa de aquecimento de 8 °C/min, seguida de aquecimento de 500 a 750 °C por 1 hora, com rampa de 4 °C/min. Após a conclusão, a mufla manteve-se a 750 °C por 2 horas. Em seguida, o cadinho foi retirado, resfriado em dessecador por 1 hora e pesado em balança analítica, obtendo-se a massa residual ( $M_{\text{residual}}^2$ ). O teor de cinzas foi calculado conforme a Equação 4.

$$\% \text{ Cinzas} = \left( \frac{M_{\text{inicial}}}{M_{\text{residual}}^2} \right) \times 100\% \quad \text{Eq. 4}$$

Em que:

$M_{\text{inicial}}$  = massa inicial da amostra seca (g)

$M_{\text{residual}}^2$  = massa final da amostra pós rampa (g)

#### 4.4.5 Carbono fixo

O teor de carbono fixo é uma medida indireta e pode ser calculado utilizando-se a Equação 5:

$$\% \text{ Carbono Fixo} = 100 - (\% \text{ Material volátil} + \% \text{ Cinzas}) \quad \text{Eq. 5}$$

#### 4.4.6 Poder Calorífico Superior (PCS)

As análises do Poder Calorífico Superior (PCS) do lodo utilizado neste estudo foram realizadas por energia bruta, empregando o calorímetro IKA C 5000, conforme procedimento padronizado. Previamente, as amostras foram maceradas em almofariz e pistilo até atingirem uma granulometria entre 0,5 e 1,0 g e classificadas com o auxílio de peneiras. Quando as amostras apresentaram elevado teor de gordura ou características que dificultaram a compactação na prensa, utilizou-se o método alternativo com cápsula para a realização da combustão.

Nesse procedimento, a cápsula foi inicialmente pesada e o valor registrado como PESO CÁPSULA. Em seguida, o peso obtido foi multiplicado pelo valor de energia informado na embalagem, obtendo-se a ENERGIA CÁPSULA. A cápsula aberta foi posicionada no suporte da balança, realizando-se a tara para posterior adição de 0,4g da amostra. Após a colocação da amostra, registrou-se o peso correspondente e, em seguida, a cápsula foi fechada sem travamento completo. Antes da introdução no cadinho, a cápsula foi cuidadosamente aberta novamente para a inserção de um fio de algodão, o qual foi fixado em seu interior, sendo a cápsula pressionada até o travamento. Por fim, o vaso foi fechado e levado à bomba para a combustão. Ao término, o equipamento forneceu o valor de energia em cal/g, registrado para cada amostra. Por fim, realizou-se a despressurização, seguida da limpeza e secagem completa do vaso calorimétrico, conforme descrito no manual do equipamento.

Para cada lodo a análise de PCS foi feita em duplicata, ou seja, foi determinado o PCS de duas amostras de cada mês e posteriormente calculada uma média entre os valores. Caso a variação entre as duplicatas fosse maior do que 2% seria necessário realizar uma terceira análise.

### 4.5 CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO LODO GERADO

#### 4.5.1 Isolamento de bactérias

A seleção dos microrganismos foi conduzida a partir de diluições seriadas de lodo em solução salina estéril 0,85%. A inoculação foi realizada em placas de Petri contendo o meio de cultura Plate Count Agar (PCA), escolhido por se tratar de um

meio não seletivo e de uso geral, apropriado para o crescimento de ampla variedade de bactérias heterotróficas mesófilas e psicrófilas (Rodrigues; Tavares; Santos, 2023). Alíquotas de 100 µL da diluição correspondente a  $10^{-6}$  foram semeadas em triplicata pelo método de espalhamento superficial. As placas foram incubadas a 37 °C por 48 h, permitindo o desenvolvimento das colônias.

#### 4.5.2 Seleção e preservação das cepas bacterianas

As unidades formadoras de colônia (UFC) bem definidas foram selecionadas para isolamento, sendo transferidas para novas placas de Petri por estriamento e incubadas novamente sob as mesmas condições. Quando necessário, o procedimento de plaqueamento por estrias foi repetido até a obtenção de culturas puras. Após a confirmação da pureza, procedeu-se à caracterização morfológica das colônias por observação visual, considerando aspectos como forma, tamanho, cor e textura. Em seguida, as culturas foram submetidas à análise morfotintorial por meio da coloração de Gram, conforme o método descrito por Strohl et al. (2004). As culturas puras e caracterizadas foram preservadas para análises e identificações posteriores.

#### 4.5.3 Extração de DNA de isolados bacterianos

Os isolados bacterianos foram cultivados em meio nutritivo sob agitação e temperatura controlada por 24 horas. Após a incubação, as células foram centrifugadas e o DNA genômico extraído segundo protocolo específico para bactérias Gram-positivas. A qualidade e a integridade do material genético foram verificadas por espectrofotometria e eletroforese em gel de agarose.

A região 16S do DNA foi amplificada por PCR utilizando primers universais, gerando fragmentos de aproximadamente 1500 pares de bases. As condições de ciclagem térmica seguiram parâmetros padrão, e os produtos amplificados foram analisados por eletroforese. Em seguida, as amostras foram quantificadas e enviadas para sequenciamento. Os eletroferogramas obtidos foram processados em software de alinhamento e comparados às sequências depositadas em bancos de dados por meio do BLASTn, para identificação das espécies bacterianas.

## 4.6 AVALIAÇÃO QUALITATIVA DE ATIVIDADE ENZIMÁTICA

### 4.6.1 Atividade amilolítica

A atividade amilolítica das bactérias isoladas foi avaliada em placas de Petri contendo meio de cultura com amido a 1% como única fonte de carbono. O meio foi preparado segundo Lozada (2015), com adaptações, utilizando 10 g de amido (maisena), 0,4 g de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ , 0,8 g de  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ , 0,12 g de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 0,12 g de  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  e 20 g de ágar bacteriológico em 1000 mL de água destilada. As bactérias foram inoculadas por picada central, utilizando agulha microbiológica, em quadruplicata, e incubadas em estufa a 36 °C por 48 horas. Após a incubação, as placas foram coradas com solução de Lugol a 1% por 15 minutos para visualização dos halos de hidrólise do amido, que indicam a atividade enzimática amilolítica, permanecendo sobre a bancada por 24 horas para observação.

### 4.6.2 Atividade proteolítica

A atividade proteolítica dos isolados bacterianos foi avaliada em placas de Petri contendo meio de cultura composto por 5 g de peptona bacteriológica, 2,5 g de extrato de levedura, 1 g de glicose, 1 g de leite em pó e 10 g de ágar bacteriológico para cada 1000 mL de água destilada, com pH ajustado para 6,5 utilizando ácido sulfúrico e/ou hidróxido de potássio, conforme descrito por Huff (2019). As bactérias foram inoculadas por picada central a partir de cultura recente e as placas incubadas em estufa a 36 °C por 48 horas. A atividade proteolítica foi identificada pela presença de halos translúcidos de degradação proteica ao redor das colônias.

### 4.6.3 Atividade celulolítica

Para avaliação da atividade celulolítica, utilizou-se meio de cultura contendo 1,5% de carboximetilcelulose (CMC) como única fonte de carbono, suplementado com 0,2 g de  $\text{NaNO}_3$ , 0,1 g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 0,05 g de  $\text{MgSO}_4$ , 0,05 g de  $\text{KCl}$  e 1,7 g de ágar para cada 100 mL de água destilada, conforme descrito por Thiele (2021). O pH do meio, estabilizado entre 5,2 e 5,9, foi ajustado antes da esterilização em autoclave a 121 °C por 20 minutos. As placas preparadas com meio CMC foram inoculadas por

picada central utilizando agulha bacteriológica e incubadas a 36 °C por 48 horas. A atividade celulolítica foi detectada pela presença de halo enzimático, revelado após coloração das placas com corante Vermelho do Congo (2,5 mg/mL) por 30 minutos, seguida da lavagem com solução de NaCl 1 M, conforme método descrito por Teather e Wood (1982).

#### 4.6.4 Atividade lipolítica

A avaliação do potencial lipolítico dos isolados bacterianos foi realizada por meio de testes em dois protocolos distintos, utilizando diferentes substratos como única fonte de carbono para detectar atividades de lipases e esterases. No primeiro protocolo, baseado em Sierra (1957) com modificações, o meio de cultura foi preparado com 10 g de peptona, 5 g de NaCl, 0,1 g de  $\text{CaCl}_2$ , 20 g de ágar bacteriológico e 1% de Tween-20 ou Tween-80 em 1000 mL de água destilada. Após autoclavagem, o meio foi resfriado a 50 °C, o substrato adicionado e homogeneizado antes de ser vertido em placas de Petri. O Tween serviu como única fonte de carbono, e a atividade lipolítica foi evidenciada pela formação de precipitação dos sais de cálcio.

No segundo protocolo, descrito por Ramnath et al. (2017), utilizou-se um meio contendo 0,01% de vermelho de fenol, 1 g de  $\text{CaCl}_2$ , 1% de óleo vegetal (azeite) e 20 g de ágar bacteriológico em 1000 mL de água destilada, com pH ajustado para 7,3–7,4 usando NaOH 0,1 N. Após autoclavagem e resfriamento a 50 °C, o substrato foi incorporado, e o meio vertido em placas de Petri. Neste protocolo, o vermelho de fenol atua como indicador de pH, onde a utilização do substrato pela bactéria altera o pH do meio, provocando mudança de coloração do amarelo-alaranjado para vermelho.

Ambos os meios foram inoculados por picada central com agulha bacteriológica, incubados a 36 °C por 48 horas para a análise inicial da formação de precipitados ou mudança de cor, e posteriormente mantidos à temperatura ambiente por mais 3 dias para nova avaliação dos resultados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises realizadas ao longo de seis meses possibilitaram uma avaliação detalhada das características físico-químicas do lodo biológico proveniente do sistema de tratamento da cooperativa estudada. As amostras foram coletadas mensalmente do ponto de recirculação do decantador secundário entre junho e novembro de 2024, com o apoio da equipe de gestão ambiental local, garantindo a representatividade do material analisado.

Os parâmetros investigados incluíram a determinação do teor de sólidos, percentual de umidade, análise imediata para quantificação de cinzas e teor de carbono. Esses indicadores são fundamentais para compreender a composição do lodo, avaliar sua estabilidade e inferir potenciais aplicações, seja no reaproveitamento energético, no uso agrícola ou em processos biotecnológicos.

A seguir, os resultados obtidos são discutidos de forma comparativa, considerando variações sazonais, tendências observadas ao longo do período de monitoramento e suas implicações em termos de manejo e valorização do resíduo.

### 5.1 TEOR DE UMIDADE E SÓLIDOS

A análise de teor de umidade foi realizada conforme descrito na seção de metodologias, sendo que cada mês foi analisado em triplicata, com o objetivo de minimizar os erros operacionais envolvidos nessa etapa. A Tabela 9 apresenta os percentuais presentes em cada amostra, calculada a partir da massa remanescente pós etapa de secagem em estufa.

TABELA 8 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE TEOR DE UMIDADE, COM RESPECTIVAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E ERROS PADRÃO.

Meses	1º Análise	2º Análise	3º Análise	Média (%)	Desvio padrão (%)	Erro padrão (%)
<b>Junho</b>	99,3040%	99,2435%	99,3461%	99,2979%	0,0516%	0,0298%
<b>Julho</b>	99,1872%	99,1872%	99,1872%	99,1872%	0,0000%	0,0000%
<b>Agosto</b>	99,0210%	99,0266%	99,0280%	99,0252%	0,0037%	0,0021%
<b>Setembro</b>	99,1499%	99,1827%	99,1843%	99,1723%	0,0194%	0,0112%
<b>Outubro</b>	99,1659%	99,1668%	99,1519%	99,1616%	0,0083%	0,0048%
<b>Novembro</b>	99,1715%	99,1673%	99,1633%	99,1674%	0,0041%	0,0024%

Fonte: O autor (2025).

Os valores contidos na tabela, indicam percentuais extremamente altos para a umidade, o que está de acordo com a teoria estudada por Demirbas, Edris e Alalayah (2017) em que classifica o lodo como uma mistura de resíduos composto maioritariamente por água, chegando a percentuais acima de 99% de água.

A média geral ficou muito próxima de 99,2%, o que significa que o teor de sólidos totais será um valor coerente ao residual do teor de umidade, para a análise realizada, todos os meses apresentaram mínima variação entre as réplicas (desvio padrão de 0,00% a 0,0516%), mostrando que o método de secagem foi reproduzível, conforme representado pelo gráfico a seguir.

O teor de umidade exerce influência direta sobre a eficiência do processo de combustão, uma vez que parte significativa da energia liberada durante a queima é consumida na evaporação da água presente na biomassa. Assim, quanto maior o conteúdo de umidade, menor será a fração de energia efetivamente convertida em calor útil (Embrapa, 2016). Dessa forma, para maximizar a produção energética a partir de uma menor quantidade de biomassa, torna-se essencial a etapa de secagem prévia do lodo, reduzindo o seu conteúdo hídrico. Essa prática é especialmente relevante em materiais com elevados teores de umidade, como observado no presente estudo, em que o lodo analisado apresenta características que podem comprometer o rendimento térmico caso seja utilizado in natura.

A pesquisa realizada por Padilha et al., (2019), buscou avaliar o potencial energético de lodos gerados no tratamento de efluentes de abatedouro e frigorífico de aves e apresentou valores elevados de umidade, utilizando uma amostra de lodo primário, proveniente da linha vermelha do abatedouro e do lodo secundário, proveniente da linha verde. As amostras de lodo secundário apresentaram valores de umidade próximos a 77,1%, porém o mesmo passou por uma separação do efluente líquido pelo processo de centrifugação.

Schulz (2019) desenvolveu um estudo voltado à avaliação da viabilidade técnica e econômica do aproveitamento energético do lodo biológico gerado na estação de tratamento de efluentes de um laticínio, com foco em sua utilização como combustível em caldeiras. Para tal, o autor realizou a coleta do lodo sedimentado no fundo dos decantadores secundários, submetendo-o posteriormente à desidratação mecânica em decanter centrífugo. A caracterização físico-química revelou um teor médio de umidade elevado, de 85,98%, com variação entre 82,01% e 89,95%.

Para analisar o teor de sólidos, seguiu-se o mesmo padrão estipulado para a análise anterior, conforme descrito na seção de metodologia, sendo que a Tabela 10 apresenta os percentuais de sólidos presentes em cada amostra, calculada a partir da massa remanescente pós etapa de secagem em estufa.

TABELA 9 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS, COM RESPECTIVAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E ERROS PADRÃO.

Meses	1º Análise	2º Análise	3º Análise	Média (%)	Desvio padrão (%)	Erro padrão (%)
<b>Junho</b>	0,7262%	0,7971%	0,7617%	0,7617%	0,0355%	0,0205%
<b>Julho</b>	0,8100%	0,8200%	0,8300%	0,8200%	0,0100%	0,0058%
<b>Agosto</b>	0,9700%	0,9734%	0,9720%	0,9718%	0,0017%	0,0010%
<b>Setembro</b>	0,8501%	0,8173%	0,8157%	0,8277%	0,0194%	0,0112%
<b>Outubro</b>	0,8341%	0,8332%	0,8481%	0,8385%	0,0084%	0,0048%
<b>Novembro</b>	0,8285%	0,8327%	0,8367%	0,8326%	0,0041%	0,0024%

Fonte: O autor (2025).

Os teores de sólidos totais do lodo biológico, avaliados mensalmente entre junho e novembro de 2024, apresentaram variação estreita, com médias mensais oscilando entre 0,76% (junho) e 0,97% (agosto). O desvio padrão foi reduzido em todos os períodos analisados (máximo de 0,0355% em junho e mínimo de 0,0017% em agosto) com erros padrões variando de 0,0205% a 0,0010%, reforçando a consistência dos resultados experimentais.

No presente estudo, o lodo biológico analisado apresentou um teor médio de umidade de 99,20%, correspondendo a apenas 0,89% de sólidos totais, caracterizando um material extremamente diluído. Em contraste, Schulz (2019) obteve valores significativamente mais elevados para sólidos, com média de 14,02%, resultado que pode ser atribuído à etapa adicional de desidratação por centrifugação empregada pelo autor. Situação semelhante foi observada por Padilha et al. (2019), que também realizaram a separação do efluente líquido por meio de centrifugação, obteve um percentual médio de sólidos de 12,9%. Essa diferença metodológica é determinante, uma vez que, no presente trabalho, o lodo foi avaliado in natura, sem a aplicação de processos prévios de separação ou secagem, de modo que o elevado conteúdo hídrico observado reflete diretamente as condições operacionais do sistema no momento da coleta. Essas distinções nos procedimentos de preparo das amostras reforçam a importância de considerar o histórico de tratamento do lodo ao comparar

teores de umidade e sólidos, sobretudo em estudos voltados à avaliação de potencial energético ou de viabilidade para processos térmicos.

Os resultados obtidos para o teor de sólidos no lodo biológico apresentaram valores variando entre 0,82% e 1,04%, com média de 0,89%, o que demonstra baixa variação ao longo do período analisado (junho a novembro de 2024).

Observa-se um pico em agosto (0,9718%), o que possivelmente associado a menor aporte de água de diluição ou aumento na carga orgânica, o que favorece maior concentração de biomassa. Para melhor correlacionar esses fatores, tem-se na Tabela 11 os dados fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a região local do complexo agroindustrial estudado, sendo que cada número representa a média mensal para cada indicador.

TABELA 10 - DADOS CLIMÁTICOS PARA A REGIÃO OESTE PARANAENSE NO ANO DE 2024 (JUN A NOV).

<b>Mês</b>	<b>Precipitação total (mm)</b>	<b>Temperatura máxima (°C)</b>	<b>Temperatura mínima (°C)</b>	<b>Umidade relativa máxima (%)</b>	<b>Umidade relativa mínima (%)</b>
Jun	0,002	25,079	23,215	55,378	48,628
Jul	0,009	23,386	21,376	55,194	47,989
Ago	0,016	22,651	20,604	46,536	39,582
Set	0,000	27,313	25,393	47,619	41,238
Out	0,023	29,655	27,611	53,416	45,925
Nov	0,200	25,870	24,375	75,130	69,015

Fonte: INMET (2024)

Observa-se que o mês de agosto, apresentou as menores temperaturas médias (máxima: 22,65 °C; mínima: 20,60 °C) e os menores valores de umidade relativa (máxima: 46,53%; mínima: 39,58%), além de baixa precipitação (0,016 mm). Essas condições, caracterizadas por clima mais seco e frio, podem ter influenciado a concentração de sólidos no lodo biológico. De acordo com Von Sperling (2002) a temperatura tem grande influência no metabolismo microbiano, afetando diretamente as taxas de oxidação das matérias carbonáceas e nitrogenadas. De maneira geral, a maioria das reações químicas e biológicas tendem a reduzir a taxa metabólica de microrganismos, diminuindo a degradação da matéria orgânica e favorecendo o acúmulo de sólidos. Paralelamente, a baixa umidade relativa e a escassa precipitação reduzem a diluição do afluente e podem intensificar a evaporação de água.

Nos meses subsequentes, os valores permaneceram estáveis ( $\sim 0,82\text{--}0,84\%$ ), indicando que o processo manteve equilíbrio operacional. Esses valores são consistentes com faixas relatadas na literatura para sistemas de lodo biológico, que geralmente apresentam concentrações entre 0,8% e 1,2% de sólidos totais em recirculação (Metcalf & Eddy, 2016).

## 5.2 MATERIAIS VOLÁTEIS

Na Tabela 12, observa-se que, ao longo do período analisado, as amostras apresentaram um percentual médio global de materiais voláteis de aproximadamente 57,2%, evidenciando uma tendência de redução no início da série histórica, com valores passando de 61,80% em junho para 54,89% em setembro, seguida de estabilização em torno de 55–56% nos meses subsequentes. Essa redução indica uma possível alteração na relação entre sólidos orgânicos e inorgânicos, a qual pode estar associada a fatores operacionais, como o aumento da idade do lodo, mudanças nas taxas de descarte ou variações na carga afluente, incluindo aporte de sólidos inertes.

TABELA 11 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE TEOR DE VOLÁTEIS, COM RESPECTIVAS MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO

Meses	1º Análise	2º Análise	3º Análise	Média (%)	Desvio padrão (%)	Erro padrão (%)
<b>Junho</b>	62%	61%	62%	61,7957%	0,3991%	0,2304%
<b>Julho</b>	59%	59%	59%	59,3252%	0,1703%	0,0983%
<b>Agosto</b>	56%	56%	56%	55,8624%	0,2302%	0,1329%
<b>Setembro</b>	56%	56%	52%	54,8928%	2,3284%	1,3443%
<b>Outubro</b>	56%	56%	56%	56,1132%	0,1882%	0,1087%
<b>Novembro</b>	55%	55%	55%	55,1439%	0,1407%	0,0812%

Fonte: O autor (2025).

O desvio padrão manteve-se baixo na maioria dos meses, o que denota consistência nas medições, exceto em setembro, quando o valor mais elevado (2,33%) sugere instabilidade momentânea no processo ou maior heterogeneidade da amostra. Tais resultados reforçam a importância de um monitoramento integrado, correlacionando os teores de materiais voláteis com parâmetros operacionais e de

qualidade do afluente, visando identificar as causas de variações e implementar estratégias que assegurem a eficiência do tratamento biológico. Ressalta-se que os materiais voláteis correspondem majoritariamente à fração orgânica do lodo e constituem a principal fonte de energia durante a combustão, embora a queima dessa fração ocorra de forma relativamente rápida, influenciando o aproveitamento térmico (BORGES; SELLIN; MEDEIROS, 2008).

Quando comparados com estudos prévios, os valores obtidos no presente trabalho situam-se em uma faixa intermediária. Borges, Sellin e Medeiros (2008), ao caracterizarem lodos de efluentes sanitários e industriais para uso energético, verificaram teores de materiais voláteis de 43,3% para o lodo sanitário, 75,5% para lodo de indústria de celulose e papel e 46,8% para lodo têxtil, sendo que o lodo biológico proveniente da agroindústria de processamento de carnes de aves e peixes analisado neste estudo apresentou valor superior ao lodo sanitário e têxtil, porém inferior ao lodo de celulose e papel. Oda et al. (2021) encontraram valores ainda mais elevados ao estudarem lodos biológicos de indústrias têxtil (65,17%) e de papel reciclado (60,21%), próximos aos observados por Drager et al. (2021) para lodo têxtil (63,68%). De forma semelhante, Rodrigues (2010) caracterizou lodo biológico de uma indústria de polpa celulósica e obteve 61,7% de materiais voláteis, valor ligeiramente superior à média registrada no presente estudo. O estudo realizado por Padilha et al. (2019), que também analisaram o lodo gerado em um abatedouro de aves e evidenciaram um percentual de 16,4% na composição de materiais voláteis, bem abaixo do percentual acima apresentados.

Essa comparação evidencia que a composição e o teor de materiais voláteis de lodos variam substancialmente conforme a origem do efluente e as condições de tratamento, o que reforça a necessidade de análises específicas para cada matriz antes da definição de estratégias de aproveitamento energético.

O teor de materiais voláteis (MV) corresponde à fração mássica da biomassa que se volatiliza quando submetida a altas temperaturas, formando a fase gasosa resultante da degradação térmica do material. Em diversos tipos de biomassa, esse teor é naturalmente elevado, favorecendo a ignição e a rápida propagação da chama (MANTOVAN, 2022). Essa fração é a principal responsável pelo fornecimento de energia durante a combustão, embora sua queima ocorra de forma rápida, com liberação instantânea de energia (Rodrigues, 2010). A interpretação conjunta dos teores de materiais voláteis e de carbono fixo é fundamental, pois permite estimar a

velocidade com que o material atinge altas temperaturas e avaliar a estabilidade da queima (BALISTA et al., 2023). Nesse contexto, a compreensão do equilíbrio entre a fração volátil, o carbono fixo e o teor de cinzas são essenciais para projetar a eficiência energética e a viabilidade de aproveitamento térmico do lodo, o que será discutido no próximo tópico.

### 5.3 TEOR DE CINZAS

A decomposição química do combustível de biomassa, por processos termoquímicos ou bioquímicos, produz um resíduo sólido. Quando produzido pela combustão no ar, esse resíduo sólido é chamado de "cinza" e forma um parâmetro de medição padrão para combustíveis sólidos e líquidos (McKendry, 2002).

No período avaliado, o teor médio de cinzas do lodo biológico variou de 26,04% em junho a 33,99% em setembro, evidenciando uma tendência de aumento nos meses iniciais, seguida de relativa estabilização entre agosto e novembro, quando os valores oscilaram em torno de 33–34%. Esses resultados estão em consonância com os reportados na literatura, segundo os quais a fração não combustível do lodo — representada pelas cinzas — corresponde, em média, a cerca de 30% da massa seca. Apesar de não contribuírem para a geração de energia, essas cinzas são coletadas após a incineração e, geralmente, destinadas a aterros em quantidades significativas, configurando um passivo ambiental relevante (KUNZ, 2014).

TABELA 12 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE TEOR DE CINZAS, COM RESPECTIVAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E ERROS PADRÃO

Meses	1º Análise	2º Análise	3º Análise	Média (%)	Desvio padrão (%)	Erro padrão (%)
<b>Junho</b>	26,0040%	26,0314%	26,0917%	26,0424%	0,0449%	0,0259%
<b>Julho</b>	31,5952%	31,3772%	31,5405%	31,5043%	0,1134%	0,0655%
<b>Agosto</b>	34,1149%	33,8297%	33,9264%	33,9570%	0,1451%	0,0838%
<b>Setembro</b>	34,2110%	34,1359%	33,6491%	33,9987%	0,3051%	0,1761%
<b>Outubro</b>	33,6326%	33,3267%	33,5830%	33,5141%	0,1642%	0,0948%
<b>Novembro</b>	33,9218%	33,7313%	33,6161%	33,7564%	0,1544%	0,0892%

Fonte: O autor (2025).

Guaitolini (2014) caracterizou o lodo secundário de uma indústria de celulose, obtendo um teor de cinzas de 8,6% em estudo sobre a queima do material em caldeira

de leito fluidizado, valor significativamente inferior ao observado no presente estudo, o que indica um potencial energético mais favorável para o lodo analisado pelo autor. Por outro lado, Rodrigues (2010) reportou um teor de cinzas de 28,5%, mais elevado e próximo aos valores encontrados neste trabalho e aos comumente descritos na literatura para lodos industriais. Drager et al. (2021) determinaram 20,89% de cinzas para lodo têxtil, valor consideravelmente inferior ao obtido no presente estudo, enquanto Borges, Sellin e Medeiros (2008) registraram 44,3% para o mesmo tipo de resíduo, evidenciando grande variação associada às características do processo de origem. No mesmo estudo, os autores verificaram um teor residual de 13,6% para lodo de papel e celulose, compatível com a literatura para esse tipo de biomassa.

Meneghini (2015) avaliou técnica e economicamente a co-combustão de lodo primário de frigorífico para geração de vapor, obtendo 17,51% de cinzas, enquanto Sena (2005), analisando resíduo semelhante, determinou 11,68%. Já Padilha et al. (2019) estudaram lodo secundário proveniente de um processo industrial, encontrando um percentual de 42,3% de cinzas, valor superior ao reportado na literatura para esse tipo de resíduo e também acima do obtido no presente trabalho. Segundo os autores, tal resultado foi atribuído à elevada presença de materiais não voláteis no efluente que originou o lodo, característica que aumenta diretamente a fração mineral residual.

Do ponto de vista energético, teores elevados de cinzas representam um fator limitante, uma vez que essa fração não participa da combustão e pode comprometer a eficiência térmica, além de ocasionar problemas operacionais como incrustações e formação de escórias em caldeiras (McKendry, 2002). Tendo como consequência a dificuldade na transferência de calor pelos equipamentos, sendo assim, para utilização de biomassa como combustível, quanto menor o seu teor de cinzas melhor a sua qualidade (Padilha et al. 2019).

#### 5.4 CARBONO FIXO

O carbono fixo corresponde à fração sólida da biomassa que permanece após a liberação da umidade e dos materiais voláteis durante o aquecimento controlado. Essa fração é composta principalmente por carbono elementar e substâncias minerais não voláteis aderidas à matriz, sendo a porção que se decompõe mais lentamente, mantendo-se no estado sólido até temperaturas mais elevadas. No contexto

energético, o carbono fixo é responsável pela manutenção da brasa e pela liberação de calor de forma mais lenta e contínua, influenciando diretamente a estabilidade da combustão (McKendry, 2002).

A determinação do carbono fixo é geralmente realizada de forma indireta, a partir da análise imediata, calculando-se a diferença entre 100% e a soma dos teores materiais voláteis e cinzas. Combustíveis com teores mais elevados de carbono fixo são preferíveis por queimarem-se mais lentamente (Rodrigues, 2010).

No período analisado, o teor médio de carbono fixo variou de 9,17% (julho) a 12,16% (junho). Observa-se um valor mais elevado no início da série, com redução acentuada em julho, seguido de oscilações moderadas entre 9,59% e 10,37% de agosto a novembro. Essa variação inicial pode estar relacionada a diferenças sazonais na composição do lodo ou a alterações nas condições operacionais do sistema de tratamento, como variação na carga afluente, na idade do lodo ou nos processos de aeração e recirculação.

TABELA 13 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE TEOR DE CARBONO FIXO, COM RESPECTIVAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E ERROS PADRÃO

Meses	1º Análise	2º Análise	3º Análise	Média (%)	Desvio padrão (%)	Erro padrão (%)
<b>Junho</b>	12,0879%	12,6161%	11,7818%	12,1619%	0,4221%	0,2437%
<b>Julho</b>	9,0130%	9,4910%	9,0073%	9,1704%	0,2777%	0,1603%
<b>Agosto</b>	10,1976%	10,3938%	9,9503%	10,1805%	0,2222%	0,1283%
<b>Setembro</b>	9,6383%	9,5422%	9,5903%	9,5903%	0,0481%	0,0277%
<b>Outubro</b>	10,3262%	10,3465%	10,4454%	10,3727%	0,0637%	0,0368%
<b>Novembro</b>	9,9823%	9,9444%	10,0178%	9,9815%	0,0367%	0,0212%

Fonte: O autor (2025).

O desvio padrão foi baixo em todos os meses, variando de 0,0367% a 0,4221%, o que indica boa consistência nas medições e homogeneidade das amostras. O valor mais elevado de desvio em junho pode ser explicado pela maior dispersão entre as três análises realizadas nesse mês.

A média geral encontrada no presente trabalho (10,24%) é superior, porém próxima ao valor reportado por Rodrigues (2010), que evidenciou um percentual de 7,9%. Por outro lado, Drager et al. (2021) observaram valores de 14,74%, indicando um potencial de formação de brasa ligeiramente maior para o lodo gerado na indústria têxtil. Padilha (2019) registrou valores extremamente elevados para o lodo secundário,

alcançando 41% de carbono fixo — valor que, segundo o autor, é superior até mesmo ao encontrado para o cavaco (39,59%) e para a serragem de madeira (34,12%), biomassas comumente utilizadas como combustível em caldeiras.

Sena (2005) encontrou um teor de 13,85% para o carbono fixo. De forma semelhante, Mong et al. (2021) avaliaram o potencial da pirólise como método viável para o gerenciamento e valorização do lodo residual proveniente da indústria de fabricação de alimentos. Nesse estudo, a análise imediata revelou um valor de 13,02% de carbono fixo para o resíduo investigado.

Já o estudo conduzido por Almahbashi (2020), cujo objetivo foi desenvolver e otimizar o processo de produção de carvão ativado a partir de lodo de esgoto, avaliou diferentes condições de preparo e determinou um percentual de 9,58% de carbono fixo para o material analisado.

Essas variações nos teores encontrados podem ser explicadas pela própria natureza do carbono fixo, que representa o carbono residual após o processo de carbonização. Parte do carbono originalmente presente na matéria volátil é perdida durante a liberação dos compostos voláteis, o que influencia diretamente o valor final desse parâmetro.

## 5.5 PODER CALORÍFICO SUPERIOR

Define-se o poder calorífico do lodo como a quantidade de energia que é liberada pela queima de uma unidade de massa de sólidos. De forma análoga, define-se o poder calorífico do gás como a quantidade de energia que é liberada pela queima de uma unidade de volume do gás. Tanto para o gás como para o lodo, o poder calorífico depende da sua composição (JORDÃO & PESSÔA, 2017).

O Poder Calorífico Superior das amostras de lodo analisadas no presente trabalho apresentou valores médios variando entre 3238 e 3702 cal/g ao longo do período de junho a novembro. Essa oscilação evidencia a influência direta da composição físico-química do lodo sobre seu potencial energético. O maior valor foi obtido em junho (3702 cal/g), enquanto o menor foi observado em julho (3238 cal/g). Essa variação é consistente com os parâmetros previamente discutidos, especialmente em relação aos teores de cinzas, carbono fixo e fração volátil.

TABELA 14 - RESULTADOS DAS ANÁLISES DE PODER CALORÍFICO SUPERIOR, COM RESPECTIVAS MÉDIAS, DESVIOS PADRÃO E ERROS PADRÃO (CAL/G)

Meses	1º Análise	2º Análise	Média	Desvio padrão
<b>Junho</b>	3704	3700	3702	2,0
<b>Julho</b>	3242	3234	3238	4,0
<b>Agosto</b>	3500	3504	3502	2,0
<b>Setembro</b>	3478	3491	3484,5	6,5
<b>Outubro</b>	3289	3289	3289	0,0
<b>Novembro</b>	3426	3405	3415,5	10,5

Em junho, o lodo apresentou baixa concentração de cinzas (26,0%) e maior percentual de carbono fixo (12,16%), condições que explicam o PCS mais elevado. Além disso, o teor de voláteis nesse mês foi de 61,8%, valor superior aos demais meses, reforçando a presença de matéria orgânica passível de degradação térmica. Essa combinação de alta fração orgânica e baixo resíduo inorgânico resulta em maior densidade energética, refletida no PCS.

Por outro lado, em julho, o PCS foi o mais baixo (3238 cal/g), em correspondência com o maior teor de cinzas (31,5%) e o menor teor de carbono fixo (9,17%) do período. Nesse caso, a elevada fração inorgânica do lodo dilui o conteúdo energético, reduzindo sua capacidade de combustão eficiente. Esse resultado ilustra a relação inversa já consolidada na literatura entre o teor de cinzas e o poder calorífico.

Além disso, o teor de carbono fixo é um parâmetro determinante para o potencial energético de combustíveis sólidos, pois quanto maior sua concentração, maior será a estabilidade térmica, a resistência à degradação e o poder calorífico superior do material, resultando em maior liberação de energia por unidade de massa e reduzindo a necessidade de reposições frequentes de combustível. Assim, sendo, o aumento do carbono fixo está diretamente associado ao incremento do poder calorífico, servindo como um indicativo confiável do desempenho energético de diferentes biomassas e resíduos (Costa et al. 2017).

Nos meses intermediários, como agosto (3502 cal/g) e setembro (3484,5 cal/g), os valores de PCS acompanharam o equilíbrio entre os teores de cinzas (~34%), voláteis (~55-56%) e carbono fixo (~10%). Embora as cinzas tenham se mantido elevadas, a fração de voláteis e carbono fixo possibilitou a manutenção de valores medianos de PCS, ainda significativos para aproveitamento energético. Já em outubro (3289 cal/g), mesmo sem variação entre as duplicatas, o PCS permaneceu

reduzido, possivelmente em função da proporção relativamente alta de cinzas (33,5%), em detrimento da fração volátil. Em novembro (3415,5 cal/g), o PCS apresentou um leve incremento, compatível com valores intermediários de cinzas (33,7%) e carbono fixo (9,98%).

O valor médio do Poder Calorífico Superior (PCS) obtido para o lodo ao longo dos seis meses de coleta foi de 3438,5 cal/g, indicando um potencial energético moderado e relativamente estável quando o material é considerado de forma homogênea. Esse resultado é relevante, pois reflete a condição prática de aproveitamento do resíduo, já que em um processo industrial o lodo não seria segregado por mês, mas sim utilizado em conjunto. Embora tenham sido observadas variações mensais influenciadas pela composição do lodo — como diferenças nos teores de umidade, cinzas, voláteis e carbono fixo — a média evidencia que o resíduo mantém uma densidade energética consistente, suficiente para ser avaliado como combustível alternativo ou complementar em processos térmicos. Dessa forma, o valor médio reforça a viabilidade do lodo como recurso energético, ainda que condicionado à implementação de estratégias de manejo que considerem sua elevada umidade e o conteúdo de cinzas.

O trabalho desenvolvido por Rodrigues (2010), obteve um valor de 3989,4 cal/g, muito próximo ao valor médio encontrado no presente trabalho, segundo a autora o valor obtido é relativamente alto quando comparado com outros resíduos usados para fins energéticos, tornando o lodo biológico um material viável para ser encaminhado para combustão, apesar do impacto negativo causado pelas cinzas do lodo, um material inerte que não produz energia durante a queima.

Borges, Sellin e Medeiros (2008), obtiveram o valor de 4804,0 cal/g para lodo sanitário, 4660,6 cal/g para papel e celulose e 4063,1 cal/g para o lodo de indústria têxtil. Segundo os autores, os valores encontrados são superiores a compostos já empregados na geração de energia, sendo um indicativo da sua aplicabilidade como biomassa na geração de energia. Para compreender melhor a conversão de biomassa em energia é preciso entender um pouco melhor sobre a combustão desses componentes.

A combustão é definida como uma reação química exotérmica entre um combustível e um comburente, geralmente o oxigênio, que libera energia na forma de calor, possibilitando a ignição do material. Quando completa, essa reação resulta na formação de vapor de água, dióxido de carbono e cinzas residuais; quando

incompleta, entretanto, ocorre a emissão de monóxido de carbono, hidrocarbonetos e outros gases. O processo de combustão desenvolve-se em três etapas sequenciais e parcialmente sobreposta: a primeira corresponde à evaporação da umidade presente no material (fase endotérmica), a segunda refere-se à pirólise e subsequente queima dos compostos voláteis liberados, e a terceira etapa consiste na combustão do carbono fixo, que permanece incandescente até ser consumido. Esse processo, ao converter a energia química armazenada no combustível em energia térmica, torna-se a base para a geração de energia em sistemas de aproveitamento energético, como caldeiras e processos de co-combustão, nos quais o calor liberado pode ser utilizado para produção de vapor, geração de eletricidade ou aquecimento industrial (Rodrigues, 2010). Sendo o poder calorífico a quantidade de calorias liberadas por um material em sua combustão completa (Vieira, 2012).

A Tabela abaixo apresenta valores obtidos para poder calorífico dos principais materiais usados na conversão energética, bem como as biomassas com potencial de aplicação.

TABELA 15 - PRINCIPAIS FONTES DE BIOMASSA E SEUS RESPECTIVOS POTENCIAIS CALORÍFICOS

Material	Poder calorífico superior (cal/g)	Referência
Resíduo de soja	3936,4	Vieira (2012)
Casca de arroz	3506,2	Vieira (2012)
Bagaço de cana	3714,2	Vieira (2012)
Sabugo de milho	3824,1	Vieira (2012)
Cavaco de <i>Eucalyptus grandis</i> in natura	4291,8	Borges (2015)
Cavaco de <i>Eucalyptus grandis</i> torrefeito (250 °C)	4400,6	Borges (2015)
Cavaco de <i>Eucalyptus grandis</i> torrefeito (290 °C)	5805,7	Borges (2015)
Cavaco de <i>Eucalyptus grandis</i> torrefeito (310 °C)	6208,2	Borges (2015)
Pellets de <i>Eucalyptus cloeziana</i>	4761,5	Ladeira (2019)
<i>Eucalyptus cloeziana</i> in natura	4721,1	Ladeira (2019)
Cavaco de bambu	5270,8	Santos (2021)
Cavaco de <i>Eucalyptus</i> spp.	4419,42	Balista et al. (2023)
Sorgo forrageiro	4168,3	Melo et al. (2023)
Sorgo granífero	4244,8	Melo et al. (2023)

Conforme apresentado, o valor médio de 3438,5 cal/g encontrado para o lodo está muito próximo ao de algumas biomassas agroindustriais já utilizadas como combustível. Por exemplo, a casca de arroz (3506,2 cal/g) e o bagaço de cana (3714,2 cal/g) apresentam valores similares, sendo amplamente empregados em caldeiras como fontes energéticas renováveis. Esse paralelo reforça que, mesmo com limitações inerentes, o lodo possui um potencial energético comparável a resíduos consolidados no setor energético.

Quando comparado ao sabugo de milho (3824,1 cal/g) e a outros resíduos agrícolas, o lodo apresenta valores um pouco inferiores, mas ainda dentro de uma faixa considerada aceitável para aproveitamento térmico. Em contrapartida, materiais lignocelulósicos de maior densidade energética, como o cavaco de eucalipto in natura (4291,8 cal/g) ou os pellets de eucalipto (4761,5 cal/g), superam significativamente o PCS do lodo. Esse contraste demonstra que, isoladamente, o lodo tem menor competitividade frente a biomassas processadas ou de alta qualidade energética.

Valores ainda mais elevados, como os obtidos para cavacos torrefeitos de eucalipto (5805,7–6208,2 cal/g) e cavaco de bambu (5270,8 cal/g), estão muito além do observado para o lodo, evidenciando que, embora o resíduo possua potencial energético, dificilmente terá desempenho equivalente a biomassas tratadas termicamente ou de alto rendimento.

De forma geral, o PCS médio obtido para o lodo biológico o posiciona em uma faixa intermediária de aproveitamento energético: inferior a biomassas de alta densidade energética, mas comparável a resíduos agrícolas de uso consolidado, como bagaço de cana e casca de arroz. Isso indica que há possibilidade de utilizar o lodo como matéria-prima energética, sobretudo em sistemas de co-combustão, nos quais pode ser misturado a biomassas de maior PCS para equilibrar rendimento e reduzir problemas operacionais associados à elevada umidade e ao teor de cinzas.

Assim, embora o lodo não se apresente como um substituto direto para combustíveis tradicionais ou biomassas processadas, ele representa uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente interessante para diversificação da matriz energética, agregando valor a um resíduo que, de outra forma, exigiria apenas destinação e tratamento.

Embora os resultados obtidos para o PCS indiquem que o lodo apresenta um potencial energético comparável a algumas biomassas já utilizadas, é importante destacar que essas análises não são suficientes para validar integralmente sua

aplicação como combustível. O PCS fornece apenas uma estimativa da energia liberada na combustão completa, mas não contempla fatores cruciais para a viabilidade prática, como comportamento térmico em escala industrial, emissão de poluentes atmosféricos, formação de escórias e cinzas, além da influência da elevada umidade e da heterogeneidade do resíduo.

Dessa forma, o valor energético encontrado deve ser interpretado como um indicativo preliminar de potencial, e não como uma garantia de aplicabilidade imediata. Para consolidar o uso do lodo como biomassa, torna-se necessária a realização de análises complementares, como estudos de pirólise, caracterização elementar, ensaios de combustão em escala piloto e avaliações ambientais e econômicas, permitindo compreender com maior profundidade não apenas o rendimento energético, mas também os impactos e limitações associados ao seu aproveitamento.

## 5.6 CARACTERIZAÇÃO MICROBIOLÓGICA DO LODO

A caracterização microbiológica do lodo foi conduzida a partir do isolamento e análise de diferentes colônias bacterianas, obtidas em meios de cultivo seletivos. Nesse processo, foram identificadas seis bactérias com morfologias aparentes distintas, entretanto, apenas quatro delas puderam ser classificadas com segurança por meio de sequenciamento genético.

A coloração de gram revelou a predominância por bactérias do tipo gram positivo e características microscópicas do tipo bacilo em forma de bastonete, típica de muitas bactérias, e diplobacilo que ocorre após a divisão celular, onde duas células permanecem unidas, formando pares. Isso é resultado do padrão de divisão e da forma como a parede celular se organiza. Na tabela a seguir está apresentado a característica de cada uma.

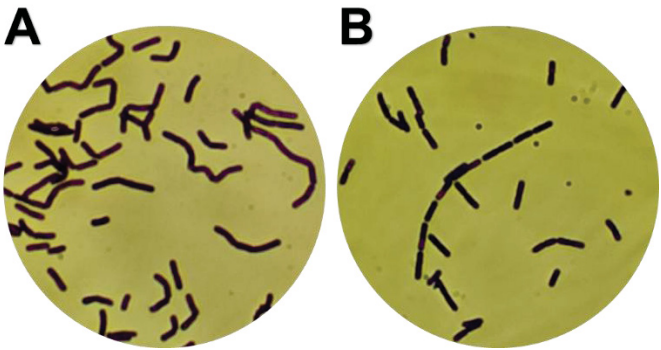
TABELA 16 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS BACTÉRIAS ISOLADAS DO LODO BIOLÓGICO PROVENIENTE DE UM COMPLEXO AGROINDUSTRIAL

Bactéria	Gram	Morfologia
1	Gram positiva	Bacilo
2	Gram positiva	Bacilo
3	Gram positiva	Bacilo/Diplobacilo
4	Gram positiva	Bacilo
5	Gram positiva	Bacilo
6	Gram positiva	Bacilo

Fonte: O autor (2025).

A presença exclusiva de bactérias Gram-positivas no lodo biológico sugere a seleção de microrganismos mais resistentes às condições ambientais do sistema, devido à parede celular espessa e, em alguns casos, à capacidade de formar endósporos. Esses microrganismos, como os do gênero *Bacillus*, destacam-se pela produção de enzimas extracelulares, biossurfactantes e bacteriocinas, que favorecem a degradação de compostos complexos e o controle de populações indesejáveis. Contudo, tal predominância pode estar associada a limitações metodológicas do cultivo, que tendem a sub-representar bactérias Gram-negativas, geralmente abundantes em sistemas de lodo biológico (Xiang et al. 2024). Na figura abaixo, está a representação microscópica dos dois principais grupos morfológicos das bactérias encontradas.

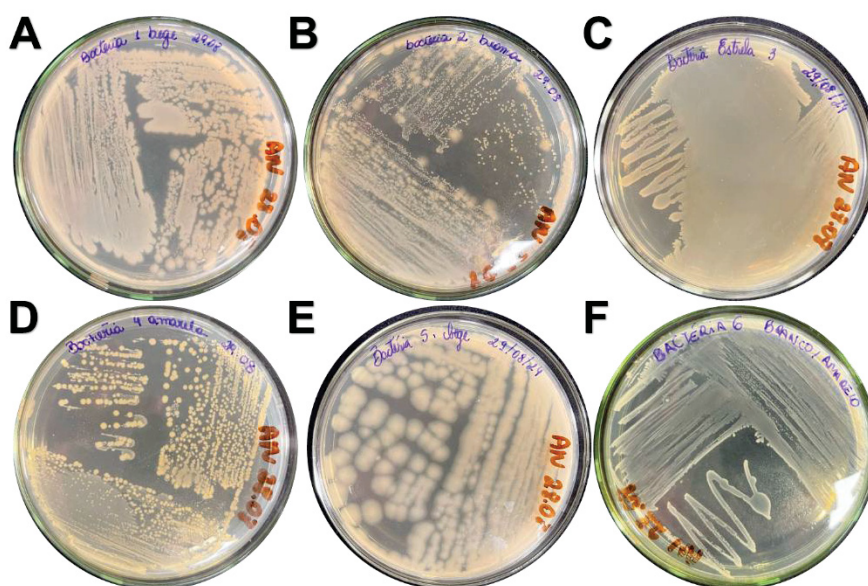
FIGURA 4 - GRUPOS MORFOLÓGICOS DAS BACTÉRIAS ISOLADAS



Fonte: O autor (2025)  
Legenda: A) Diplobacilo; B) Bacilo

Os fragmentos amplificados (região forward) apresentaram tamanhos variando entre 863 e 925 pb, possibilitando a identificação de espécies pertencentes principalmente ao gênero *Bacillus*. As sequências revelaram a presença de *Bacillus cereus* (863 pb e 925 pb), *Kurthia ginsonii* (881 pb) e *Bacillus pumilus* (925 pb) e *Bacillus spp.* (925 pb), conforme apresentado na figura a seguir.

FIGURA 5 - BACTÉRIAS ISOLADAS DO LODO BIOLÓGICO PROVENIENTE DE UM COMPLEXO AGROINDUSTRIAL



Fonte: O autor (2025)

Legenda: A) *Bacillus cereus*; B) Não identificada pelo sequenciamento; C) Não identificada pelo sequenciamento; D) *Kurthia gibsonii*; E) *Bacillus sp.*; F) *Bacillus pumilus*

Os resultados dos sequenciamentos foram validados por meio da ferramenta BLAST. A tabela a seguir apresenta a cobertura das sequências, os valores de E-value, a identidade obtida e os respectivos números de acesso dos microrganismos identificados.

TABELA 17 - RESULTADO DO BLAST PARA O SEQUENCIAMENTO

Espécie	Cobertura da sequência	E-value	Identidade de Sequência	Número de acesso NCBI
<i>Bacillus cereus</i>	60%	0	91.39%	KP743133.1
<i>Bacillus cereus</i>	85%	0	98.10%	KT324620.1
<i>Bacillus pumilus</i>	56%	5e <sup>-163</sup>	91.51%	LC133075.1
<i>Kurthia gibsonii</i>	90%	0	96.08%	OQ406239.1

Esse resultado é consistente com a literatura, que aponta os gêneros *Bacillus* e *Kurthia* como microrganismos comuns em lodos biológicos devido à sua resiliência em ambientes com elevada carga orgânica e capacidade de participar de processos como degradação de matéria orgânica, produção de enzimas extracelulares e, em alguns casos, atividade biorremediadora.

A predominância de espécies do gênero *Bacillus* sugere que o lodo estudado abriga uma microbiota com potencial metabólico relevante, capaz de contribuir tanto para a estabilização do resíduo quanto para possíveis aplicações biotecnológicas, incluindo degradação de compostos orgânicos complexos e até produção de metabólitos de interesse industrial.

#### 5.6.1 *Bacillus* spp.

O gênero *Bacillus* compreende espécies predominantemente Gram-positivas, embora algumas possam apresentar variações morfológicas que dificultam a coloração de Gram, medindo entre 1,2 e 7,0  $\mu\text{m}$  de comprimento. A maioria dessas bactérias apresenta motilidade, decorrente da presença de flagelos dispostos de forma peritríquia. Quanto ao metabolismo, as espécies podem ser estritamente respiratórias, fermentativas ou apresentar ambas as vias, sendo comum a produção da enzima catalase, característica que contribui para sua adaptação a diferentes condições ambientais (Lago, 2002).

Esse gênero é capaz de formar esporos, apresentando elevada versatilidade metabólica (Haq et al. 2021). Fato que proporciona várias vantagens sobre outros microrganismos não-formadores de esporos, tais como a resistência a elevadas temperaturas e pressão (como 75°C), resistências a ambientes ácidos e alcalinos (variando de pH 2 a 10) e elevada resistência a temperaturas ambiente e refrigeradas (-5° C) proporcionando uma elevada vida de prateleira (Lago, 2002; Alves e Teshima, 2017).

A produção dessas moléculas encontra-se bem distribuída em diferentes espécies do gênero, incluindo *B. subtilis*, *B. pumilus*, *B. licheniformis* e *B. amyloliquefaciens* (Sansinenea, 2019). Apesar de serem conhecidas como probióticos e usos medicinais, essa espécie é amplamente reconhecida por causar intoxicações alimentares. Entretanto, estudos têm demonstrado que *Bacillus cereus*

também pode ser empregado na biodegradação e biorremediação de solos (Xiang et al. 2024).

Isso porque os metabólitos secundários produzidos por espécies do gênero *Bacillus* incluem, entre outros, surfactantes e bacteriocinas, os quais desempenham funções relevantes tanto em processos ecológicos quanto em aplicações biotecnológicas. Dentre esses compostos, destacam-se os biosurfactantes lipopéptidicos, moléculas de natureza anfifílica que apresentam elevada atividade de superfície e expressiva capacidade inibitória frente a diversos fitopatógenos. Tais características conferem a esses metabólitos um amplo potencial de aplicação nos setores agrícola, químico, alimentício e farmacêutico. Além disso, alguns biosurfactantes têm sido apontados como alternativas promissoras aos medicamentos sintéticos e aos agentes antimicrobianos convencionais (Sansinenea, 2019).

Essas características conferem a tais microrganismos a capacidade de remover, metabolizar ou biodegradar diferentes tipos de resíduos orgânicos, poluentes e metais presentes no ambiente. Além disso, destacam-se como um dos principais grupos microbianos constituintes da microbiota associada ao lodo biológico em sistemas de tratamento de efluentes, desempenhando papel relevante tanto nos processos de estabilização da matéria orgânica quanto na dinâmica da resistência microbiana (Haq et al. 2021).

*Bacillus cereus* é um microrganismo ubíquo na natureza, tendo o solo como seu habitat predominante. Trata-se de uma bactéria em forma de bastonete Gram-positivo, medindo entre 1,0 e 1,2  $\mu\text{m}$  de largura por 3,0 a 5,0  $\mu\text{m}$  de comprimento. Uma de suas principais características é a capacidade de formar esporos, geralmente de formato elipsoidal ou cilíndrico e localizados em posição centro-terminal. Esses esporos conferem elevada resistência, permitindo a sobrevivência do microrganismo a condições ambientais adversas, incluindo altas temperaturas e longos períodos de inatividade. A temperatura ótima para o crescimento de *B. cereus* situa-se na faixa de 30 a 37 °C, favorecendo sua ampla disseminação em diferentes ecossistemas e substratos (Lago, 2002).

Já a espécie *Bacillus pumilus* é uma bactéria Gram-positiva formadora de esporos, que ocorre comumente em diversos ambientes, incluindo água marinha, sedimentos de águas profundas e solo, apresentando significativa resistência a estresses ambientais, como baixa ou nenhuma disponibilidade de nutrientes, seca,

radiação, radiação UV, desinfetantes químicos ou enzimas oxidantes (Dobrzyński, Jakubowska e Dybek, 2022)

As espécies de *Bacillus* possuem um eficiente sistema de secreção e produzem uma ampla variedade de enzimas extracelulares de interesse para as indústrias de detergentes, têxteis, alimentícias, de rações e de bebidas. Entre as enzimas destacam-se amilases, pullulanases e  $\beta$ -glucanases, aplicadas nas indústrias de panificação e cervejaria;  $\beta$ -galactosidases, utilizadas nas indústrias de açúcar de beterraba, celulose e papel; celulasas e xilanases, voltadas para o setor de papel e celulose; quitinases, aplicadas na indústria alimentícia; e esterases e lipases, amplamente empregadas no setor de detergentes (Sansinenea, 2019)

#### 5.6.2 *Kurthia* sp.

*Kurthia* é um gênero bacteriano pertencente à família Planococcaceae, filogeneticamente relacionado a representantes dos gêneros *Lactobacillus*, *Bacillus*, *Staphylococcus* e *Streptococcus*. Esses microrganismos são comumente isolados de carnes, produtos cárneos e lácteos, destacando-se pela capacidade de sintetizar peptídeos com potencial atividade antimicrobiana. Entretanto, até o presente momento, a atividade antibacteriana desses peptídeos frente a patógenos intestinais não havia sido documentada na literatura científica (Chauhan e Samant, 2022).

Desde a sua descoberta em 1883 por Hermann Kurth, as espécies de *Kurthia* (*Kurthia* spp.) são conhecidas por sua ampla distribuição ambiental e pelo potencial de causar infecções oportunistas. São consideradas, em sua maioria, bactérias não patogênicas e o grupo é composto por oito espécies reconhecidas: *Kurthia zopfii*, *Kurthia gibsonii*, *Kurthia sibirica*, *Kurthia massiliensis*, *Kurthia huakuii*, *Kurthia senegalensis*, *Kurthia ruminicola* e *Kurthia Populi* (Lozica, 2022; Romance, 2024).

Espécies do gênero são frequentemente encontradas em diferentes nichos ambientais, incluindo materiais orgânicos em decomposição, carcaças de suínos, fezes de animais de criação, carne suína deteriorada e outros produtos alimentícios (Kövesdi, 2016). Dentre elas, destaca-se a relevância como microrganismos de deterioração de alimentos, estando predominantemente associadas ao desenvolvimento de odores e sabores indesejáveis em carnes curadas, carnes frescas e derivados cárneos mantidos sob condições de armazenamento em temperaturas elevadas (Lorenzo, 2022).

*Kurthia gibsonii* tem sido relatada como um patógeno oportunista emergente em coinfeções secundárias em aves de produção, juntamente com *E. coli*, em patologias que podem ocasionar condro-necrose e osteomielite em articulações dos membros inferiores (Lopez 2023). Em razão do exposto, explica a presença dessa bactéria no material estudado, tendo em vista a pouca relação com o sistema de tratamento por lodos ativados.

Alguns estudos indicam que o gênero *Kurthia* desempenha uma ampla variedade de funções biológicas, incluindo a capacidade de degradar diferentes poluentes orgânicos, possivelmente associada à produção de surfactantes microbianos. Ademais, destaca-se por apresentar vantagens adaptativas relevantes, como resistência a condições de elevada salinidade, alcalinidade e à presença de solventes orgânicos (Wang et al. 2024).

## 5.7 ATIVIDADES ENZIMÁTICAS DAS BACTÉRIAS ISOLADAS

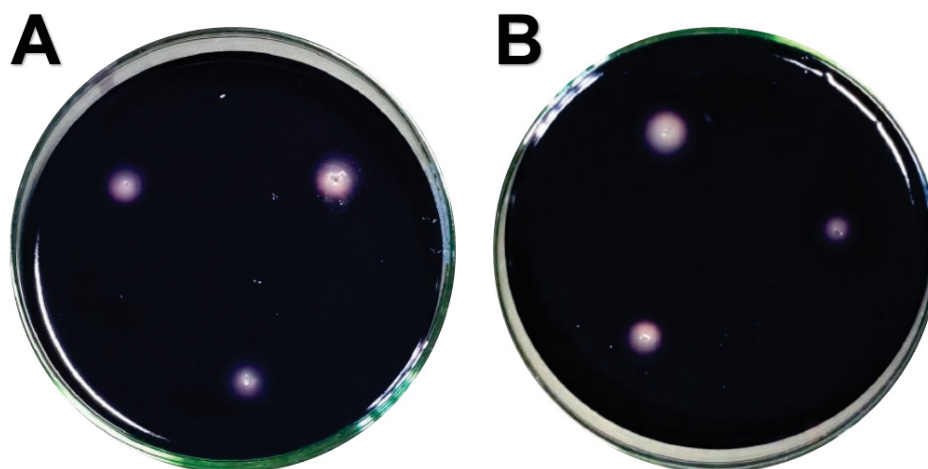
### 5.7.1 Atividade amilolítica

Realizou-se o teste de amilolise para todas as bactérias isoladas em placa de Petri contendo o meio de crescimento acrescido de amido, a fim de verificar a formação de halos de amilolise ao redor das colônias da bactéria, uma vez que a degradação do amido seria dada em função da liberação de enzimas no meio por parte do microrganismo avaliado.

A adição de solução de Lugol promove a coloração intensa do meio, conferindo-lhe um tom escuro característico em virtude da interação do iodo com o amido não hidrolisado. Dessa forma, a visualização da atividade amilolítica dos isolados bacterianos ocorre por meio da formação de zonas translúcidas ou claras ao redor ou no ponto de inoculação, resultantes da degradação do amido presente no meio. Essas áreas de transparência contrastam com o fundo escurecido do ágar, permitindo identificar qualitativamente a presença da enzima amilase e a extensão de sua ação.

O ensaio de atividade amilolítica revelou que, entre os microrganismos avaliados, apenas os dois isolados de *Bacillus cereus* apresentaram crescimento visível acompanhado da formação de pequenos halos de degradação nos pontos de inoculação. Esses resultados estão demonstrados na figura abaixo.

FIGURA 6 - DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL AMIOLÍTICO DOS ISOLADOS POR ENSAIO EM ÁGAR AMIDO



Fonte: O autor (2025)  
Legenda: A) *Bacillus cereus*; B) *Bacillus spp.*

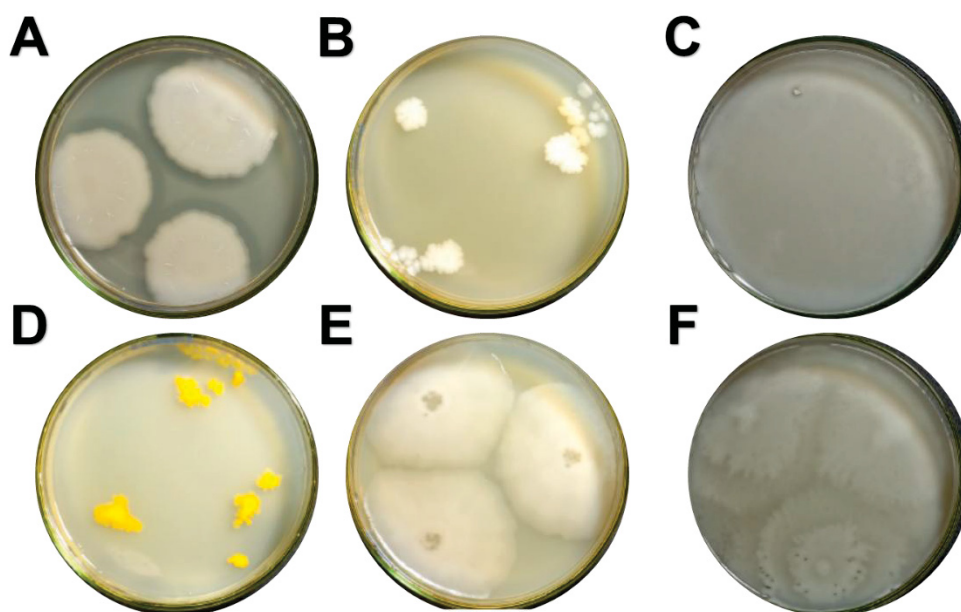
O ensaio de atividade amilolítica indicou potencial de crescimento microbiano e possível produção enzimática, ainda que de forma discreta. A formação de halos sutis de hidrólise sugere que as condições adotadas permitiram certa expressão da amilase, apontando para a viabilidade metabólica das cepas testadas e abrindo perspectiva para ajustes futuros de cultivo e detecção enzimática.

Diferente de estudos realizados presentes na literatura que correlacionam a atividade amilolítica de *Bacillus cereus*, como o realizado por Hmida et al. (2024), em que foi utilizada uma cepa isolada de *B. cereus* (spH1) que demonstrou alta produção de  $\alpha$ -amilase. Sob condições otimizadas, essa cepa alcançou atividade enzimática de até 8,5 U/mL, apresentando robusta estabilidade térmica — mantendo mais de 90 % da atividade residual a 55 °C. Adtiloye et al (2025) avaliaram outro estudo com cepa termofílica de *B. cereus*, isolada de nascentes quentes, esta atingiu atividade amilolítica de até 196,02 U/mL com uso de modelagem estatística (RSM). Além disso, Huang et al. (2022) estudaram três genes codificadores de amilases, sendo o gene *amyS* responsável por codificar uma  $\alpha$ -amilase extracelular. A deleção desse gene aboliu completamente a capacidade de hidrólise de amido, demonstrando claramente o papel dessa enzima.

### 5.7.2 Atividade proteolítica

No teste da atividade proteolítica foi possível observar que apenas a bactéria A (*B. cereus*) apresentou halo de degradação do substrato. Para os demais isolados não foram observados crescimento.

FIGURA 7 - DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL PROTEOLÍTICO DOS ISOLADOS



Fonte: O autor (2025)

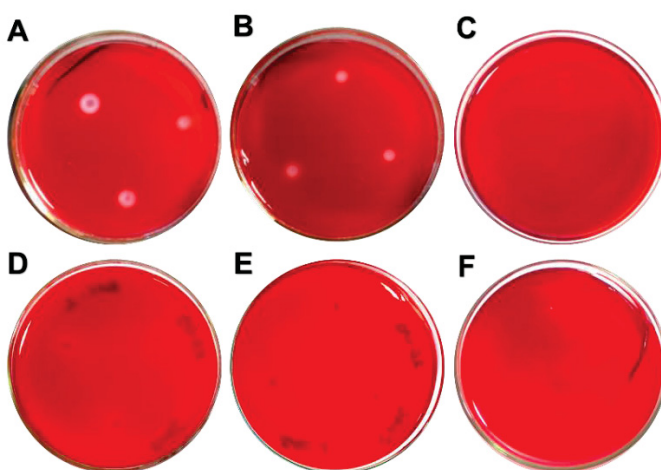
Legenda: A) *Bacillus cereus*; B) Não identificada pelo sequenciamento; C) Não identificada pelo sequenciamento; D) *Kurthia gibsonii*; E) *Bacillus sp.*; F) *Bacillus pumilus*

A ausência de halo de proteólise nos isolados de *Bacillus pumilus* e demais bactérias, pode ser atribuída a limitações metodológicas e fisiológicas relacionadas à expressão de proteases extracelulares. A secreção enzimática em *Bacillus* é frequentemente regulada por disponibilidade de nutrientes e condições ambientais; assim, a falta de indutores proteicos ou a presença de fontes de carbono facilmente assimiláveis pode ter reduzido a expressão das proteases. Além disso, fatores como o tipo de substrato proteico empregado, pH do meio, presença de íons estabilizantes (Majeed et al. 2024).

### 5.7.3 Atividade celulolítica

No ensaio de atividade celulolítica, verificou-se que *Bacillus pumilus* e *Bacillus spp.* apresentaram baixa atividade enzimática, conforme representado na Figura 9, é possível verificar halos de hidrólise ao redor da colônia, evidenciando a capacidade de degradação do substrato carboximetilcelulose (CMC). Essa degradação tornou-se visível após a revelação com solução de vermelho do Congo, que permitiu observar de maneira clara a utilização do substrato em pouco tempo após o desenvolvimento bacteriano. Esses resultados destacam o potencial enzimático do gênero *Bacillus* na hidrólise de celulose e reforçam a importância da seleção criteriosa de microrganismos com capacidade comprovada de produção de celulases em estudos aplicados.

FIGURA 8 - DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL CELULOLÍTICO DOS ISOLADOS



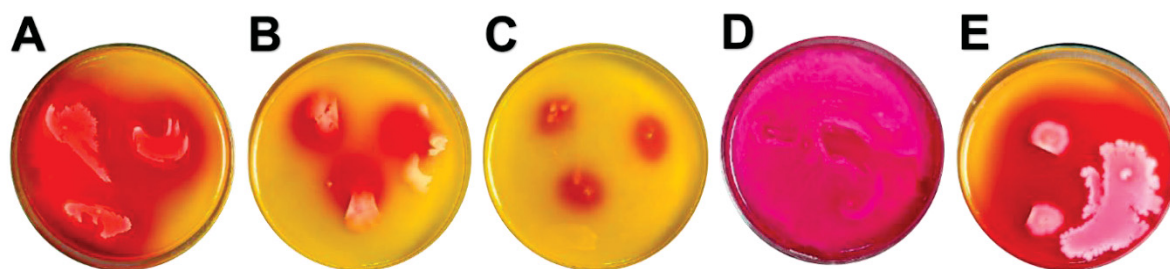
Fonte: O autor (2025)

Legenda: A) *Bacillus pumilus*; B) *Bacillus spp.* C) *Kurthia gibsonii* D e F) Não identificada E) *Bacillus Cereus*

### 5.7.4 Atividade lipolítica

Conforme descrito na metodologia, a avaliação do potencial lipolítico dos isolados foi realizada utilizando o vermelho de fenol como indicador de pH. Esse corante permite observar a utilização do substrato pelas bactérias, uma vez que a degradação dos lipídios altera o pH do meio, provocando mudança de coloração de amarelo-alaranjado (meio ácido) para vermelho (meio básico). Tal comportamento foi evidenciado em todas as placas analisadas, como ilustrado na Figura 10.

FIGURA 9 - DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL LIPOLÍTICO DOS ISOLADOS



Fonte: O autor (2025)

Legenda: A) *Bacillus pumilus*; B) *Bacillus cereus*; C) *Kurthia gibsonii*; D) *Bacillus* spp.; E) *Bacillus cereus*

A análise dos resultados demonstrou que, enquanto o meio de cultura apresentava coloração amarelada característica de acidez, os halos formados ao redor das colônias adquiriram tonalidade avermelhada, indicando regiões com pH básico e, conseqüentemente, atividade lipolítica. É importante destacar duas situações específicas: (i) na placa B, a colônia sofreu rompimento durante a aplicação do indicador, deslocando-se sobre a superfície do meio; ainda assim, foi possível observar a formação de um pequeno halo de degradação; (ii) na placa D, a colônia apresentou crescimento difuso por todo o meio, o que dificultou a visualização precisa dos halos, embora a alteração de coloração sugira atividade enzimática.

De modo geral, os resultados evidenciam um potencial degradador lipolítico mais pronunciado para as bactérias do gênero *Bacillus*, reforçando o papel dessas espécies na produção de enzimas extracelulares. Esse desempenho está associado, entre outros fatores, à síntese de metabólitos secundários, como os biossurfactantes (ex.: surfactina, iturina e fengicina), que reduzem a tensão superficial e promovem a dispersão de óleos e gorduras (Sansinenea, 2019). Tal ação favorece a biodisponibilidade dos lipídios e potencializa a atuação das lipases, enzimas responsáveis por catalisar a hidrólise das ligações éster-carboxílicas presentes nos triacilgliceróis (TAG), resultando na liberação de ácidos graxos livres, diglicerídeos (DAG), monoglicerídeos (MAG) e glicerol (Salgado, Santos & Vanetti, 2022).

Em contraste, a bactéria do gênero *Kurthia* sp. apresentou baixo desempenho nesse ensaio, com crescimento reduzido e formação de apenas um pequeno halo de atividade lipolítica. Esse comportamento sugere menor capacidade adaptativa dessa espécie às condições experimentais, quando comparada às cepas de *Bacillus*.

Portanto, os resultados obtidos sugerem que o lodo biológico possui características promissoras tanto para aproveitamento energético quanto para produção de enzimas hidrolíticas. A predominância da fração volátil e o poder calorífico compatível com resíduos agroindustriais, aliados à atividade enzimática expressa por cepas de *Bacillus*, indicam a viabilidade de estratégias integradas de valorização do lodo, unindo potencial energético e biotecnológico.

## 6 CONCLUSÃO

O lodo biológico analisado apresentou elevado teor de umidade ( $\approx 98\text{--}99,5\%$ ), o que indica a necessidade de pré-tratamentos como secagem ou co-processamento, mas também demonstra que a fração volátil predominante confere bom potencial de degradação térmica. O poder calorífico superior, entre 3238 e 3702 cal/g, mostra que o lodo é compatível com outros resíduos agroindustriais, confirmando sua viabilidade para aproveitamento energético, especialmente após adequação do conteúdo hídrico ou em co-combustão.

As avaliações enzimáticas evidenciaram que *Bacillus cereus* apresentou atividade positiva em diferentes substratos, enquanto *Bacillus pumilus* e outras espécies de *Bacillus* mostraram atividade celulolítica e lipolítica, reforçada pela produção de biossurfactantes que aumentam a disponibilidade de lipídios. Esses resultados destacam o potencial do gênero *Bacillus* como fonte promissora de enzimas extracelulares para aplicações biotecnológicas. Embora o gênero *Kurthia* tenha mostrado menor atividade, o conjunto de dados confirma que a microbiota do lodo contém microrganismos com capacidade de degradação relevante.

De forma integrada, os achados indicam que o lodo biológico possui características promissoras tanto para aproveitamento energético quanto para produção de enzimas hidrolíticas, sugerindo que estratégias combinadas podem transformar resíduos agroindustriais em recursos valiosos, promovendo sustentabilidade e inovação tecnológica.

### 6.1 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar o aproveitamento do lodo biológico em duas frentes: no potencial energético, avaliando a geração de gases durante a combustão, a co-combustão com biomassa agrícola e a composição mineral das cinzas para uso como insumo; e no potencial biotecnológico, realizando ensaios enzimáticos em meio líquido e avaliando o uso de *Bacillus* em biorremediação de efluentes e solos contaminados.

## REFERÊNCIAS

- ADETILOYE, O. O. et al. **Optimization of thermostable amylolytic enzyme production from *Bacillus cereus* isolated from a recreational warm spring via Box Behnken design and response surface methodology**. Microb Cell Fact. 2025 Apr 19;24(1):87, 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2024: **informe anual**. Brasília, DF: ANA, 2024.
- ALMAHBASHI, N. M. Y. **Optimization of preparation conditions of sewage sludge based activated carbon**. Ain Shams Engineering Journal, v. 12, n. 2, p. 1175-1182, 2021.
- ANDRADE, E. S. P. **Produção de proteases e celulasas fúngicas a partir do engaço de uva**. 2022.
- ANDREOLI, C. V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. **Lodos de esgotos: tratamento e disposição final**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2007. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 6).
- ANDRADE, E. S. P. **Produção de proteases e celulasas fúngicas a partir do engaço de uva**. 2022.
- ARAÚJO, M. C. *et al.* **Efeito do pré-tratamento enzimático na digestão anaeróbia de efluente de abatedouro de peixes**. 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PISCICULTURA (PEIXE BR). **Anuário Peixe BR da Piscicultura 2025**. Brasília, DF: Peixe BR, 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL (ABPA). **Relatório Anual 2025**. São Paulo: ABPA, 2025
- AWASTHI, M. K. et al. **A comprehensive review on thermochemical, and biochemical conversion methods of lignocellulosic biomass into valuable end product**. Fuel, v. 342, p. 127790, 2023.
- BALISTA, B. Z. et al. **Análise comparativa entre duas formas de estocagem de cavacos de eucalipto e sua influência sob o potencial energético**. Série Técnica IPEF, Piracicaba, v. 26, n. 48, 2023.
- BARROS, T. A. D.; JUNIOR, E. G. **Dificuldades da avicultura na região oeste do Paraná**. Arquivos Brasileiros de Medicina Veterinária FAG –Vol.6, no 1, jan/jun 2023
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 147, n. 147, p. 3-7, 3 ago. 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 430**, de 13 de maio de 2011. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 92, p. 89-90, 16 maio 2011.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Política Nacional de Recursos Hídricos**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 135, n. 6, p. 470-474, 9 jan. 1997.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco Energético Nacional 2024: relatório síntese**. Rio de Janeiro: EPE, 2024.

BARREIROS, J. M. **Avaliação microbiológica do lodo ativado utilizado no tratamento de resíduos orgânicos**. Dissertação (Mestrado Profissional), Universidade Metropolitana de Santos, Mestrado em Saúde e Meio Ambiente, 2022.

BENTO, A. P. **Caracterização da microfauna em estação de tratamento de esgotos do tipo lodos ativados: um instrumento de avaliação e controle do processo**. Eng. sanit. Ambient., Vol.10 - Nº 4 - out/dez 2005, 329-338, 2005.

BERNARDES, A. V. et al. **Utilização de subprodutos agroindustriais para produção de  $\alpha$ -amilase por *Rhizomucor miehei***. Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial, v. 8, n. 2, 2014.

BORGES, F.; SELLIN, N.; MEDEIROS, S. H. W. **Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia**. Ciência & Engenharia, v. 17, n. 1/2, p. 27-32, 2008.

BORGES, A. C. P. **Caracterização energética do cavaco de eucalyptusgrandis “in natura” e torrefeito**. 2015.

CAMPOS, E. G. P. et al. **Tratamento de efluente do processamento de peixe utilizando coagulação/sedimentação e flotação**. 2020.

CASAU, A. M. G. **Study of the Residual Agroforestry Biomass in Portugal: Market, Valorization, and Policies**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro (Portugal), 2022.

CHAUHAN, A.; SAMANT, S. A. **Isolation and identification of kurthia gibsonii from paneer and study its antibacterial activity against intestinal pathogens**. International Journal of Health Sciences, 6(S5), 10457–10466, 2022.

CASTRO, M. P. S. et al. **Índice de Estado Trófico de um manancial receptor de efluentes de Estação de Tratamento de Esgoto Baldo - RN**. Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária E Ambiental, Natal, no Rio Grande do Norte. Anais [...] Natal, no Rio Grande do Norte, 2019.

CEREGATTI, G. **Valorização de resíduos agroindustriais na forma de produtos com alto valor nutricional**. Universidade Federal De Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento Engenharia Química e de Alimentos, 2022.

CONRADO, M. M. **Gestão de efluente industrial em produção avícola: estudo de caso em uma empresa na Grande Florianópolis.** TCC (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Sanitária e Ambiental, 2023.

COSTA, D. C. *et al.* **Saneamento básico: panorama no Brasil e em Minas Gerais, a partir dos censos de 2010 e 2022 e percepção da população de Belo Horizonte sobre o tema.** REVISTA DELOS, 18(69), e5815, 2025.

CHIAVELLI, H. G. **Etapas de um sistema de tratamento de efluente e processos convencionais de tratamento: uma revisão de literatura.** In: IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. 2019.

COSTA, Q. M. *et al.* **Potencial De Aproveitamento De Lodo Proveniente De Estações De Tratamento De Esgoto No Estado Da Bahia.** Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2019.

DEMIRBAS, A.; EDRIS, G.; ALALAYAH, W. M. **Sludge production from municipal wastewater treatment in sewage treatment plant.** Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, v. 39, n. 10, p. 999-1006, 2017.

DOBRZYŃSKI, J; JAKUBOWSKA, Z.; DYBEK, B. **Potential of *Bacillus pumilus* to directly promote plant growth.** Frontiers in microbiology, v. 13, p. 1069053, 2022.

DRAEGER, A. *et al.* **Aproveitamento do lodo têxtil na produção de briquetes para geração de energia térmica.** Revista de Estudos Ambientais, [S. l.], v. 23, n. 1, p. 46–56, 2021.

ELIAS, A. S. *et al.* **Avaliação das enzimas lacase e protease na biodegradação de microcistina.** Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2022.

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

FERREIRA, I. M. L. **Estudo da pirólise catalítica da biomassa de microalga para obtenção de biocombustíveis renováveis utilizando materiais mesoporosos com níquel e molibdênio.** 2018.

FEIDEN, A. **Produção e rendimento industrial de entrepostos de pescado de pequeno porte do oeste do Paraná.** Research, Society and Development, v. 11, n. 11, e426111133673, 2022.

FRANCIOZI, S. A. **Uso de diferentes coagulantes no tratamento de efluente de abatedouro bovino e análise do potencial energético do lodo gerado.** Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, Programa de Pós-graduação em Biotecnologia, 2020.

FRØLUND, B. et al. **Extraction of extracellular polymers from activated sludge using a cation exchange resin.** Water Research, Volume 30, Issue 8, 1996.

GARFI, M.; FLORES, L.; FERRER, I. Life Cycle Assessment of wastewater treatment systems for small communities: **Activated sludge, constructed wetlands and high rate algal ponds.** Journal of Cleaner Production, Volume 161, 211-219, ISSN 0959-6526, 2017.

GUEDES, E. H. S. et al. **Resíduos agroindustriais como substrato para a produção de lipases microbiana: uma revisão.** Research, Society and Development, v. 10, n. 2, e30710212537, 2021.

GUEDES, I. N.; COUTO, L. A.; COQUEIRO, J. S.; et al. Agroindústria frigorífica: legislação correlatada, destinação de resíduos e aspectos ambientais: **uma revisão bibliográfica.** Meio Ambiente (Brasil), v.4, n.3. 011-025, 2022.

GERAGEI, K. R. G.; RODRIGUES, E. M. G. **Produção de amilase por Aspergillus niger.** Encontro do Programa de Monitoria nas Fatecs, v. 1, n. 1, 2023.

GUAITOLINI, M. **Estudo da queima do lodo secundário da indústria de celulose em caldeira de leito fluidizado.** 2014.

HAQ, I. et al. **A new role for SR1 from Bacillus subtilis: regulation of sporulation by inhibition of kinA translation.** Nucleic Acids Research, v. 49, n. 18, p. 10589-10603, 2021.

HUANG, Q. et al. **Production of extracellular amylase contributes to the colonization of Bacillus cereus 0–9 in wheat roots.** BMC Microbiol 22, 205 2022.

HUFF, G. M. **Identificação molecular e verificação da capacidade proteolítica de bactérias isoladas de lodo de dejetos suínos.** Relatório final de Iniciação Científica. Universidade Federal do Paraná - Setor Palotina, 2019.

HUSAM, A. N.; NASSAR, A. **Slaughterhouses wastewater characteristics in the Gaza strip.** Journal of Water Resource and Protection, 11(7), 844-851, 2019.

**INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA** (Brasil). Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos.** 8. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017.

KÖVESDI V. Kurthia gibsonii as a sexually transmitted zoonosis: **From a neglected condition during World War II to a recent warning for sexually transmitted disease units.** Indian J Sex Transm Dis AIDS. 2016.

KUNZ, E. R. Queima de lodo biológico em caldeira de biomassa de uma fábrica de celulose: **case FIBRIA.** 2014.

KÖHLER, N. E. Gestão Hídrica na cadeia de aves de corte: **Análise SWOT para sustentabilidade e competitividade**. Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2024.

KLEIN, T. **Avaliação do lodo proveniente do tratamento de efluentes de uma indústria de laticínios para produção de energia através de biomassa**. 2021.

LAGO, N. C. M. R. **Bactérias do grupo do *Bacillus cereus* em leite e estudo enterotoxigênico das cepas isoladas**. Jaboticabal, 2002 xii, 70 f. :il. ; 28 cm Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2002.

LADEIRA, L. A. **POTENCIAL ENERGÉTICO DA MADEIRA E PELLETS DE EUCALYPTUS CLOEZIANA F. MUELL**, 2019.

LIMA, A. C. M. Soja irrigada com efluente tratado de abatedouro: **cultivo em interação com a inoculação de *Bradyrhizobium spp.*** Tese (doutorado), USP, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2024.

LIBERATTI, A. S. **Tratamento de efluente de abatedouro avícola visando o reúso da água**. Universidade Tecnológica Federal Do Paraná Campus Londrina Curso De Engenharia Ambiental, 2018.

LINS, T. C.; LIMA, A. S. T. **Lodo de Esgoto como alternativa de fertilização agrícola para o município de Igaci-AL**. Research, Society and Development, v. 11, n. 8, p. e13511830461-e13511830461, 2022.

LOPEZ, D. F. et al. **First report of *Kurthia gibsonii* in the digestive system of *Apis mellifera* in an indigenous community in the south of Mexico**. EUNK Revista Científica de Abejas y Apicultores, v. 2, n. 2, p. 3-8, 2023.

LEMES, C. S. **Avaliação da qualidade da água do ribeirão sampaio em pires do rio - go antes e após o lançamento de efluente de abatedouro avícola**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Urutaí Programa de Pós-Graduação em Conservação de Recursos Naturais do Cerrado, 2021.

LORENZO, J. M. et al. **Main Groups of Microorganisms of Relevance for Food Safety and Stability: General Aspects and Overall Description**, Innovative Technologies for Food Preservation, 2022.

LOZADA, J. A. **Prospecção de bactérias do lodo de esgoto de abatedouro de aves**

LOZICA, L. ***Kurthia gibsonii*, a novel opportunistic pathogen in poultry**. *Avian Pathology*, 51(1), 26-33, 2022.

MACHADO, A. J. M. **Análise de viabilidade econômica para reaproveitamento de lodo como biomassa na geração de energia em caldeira**. 2021.

MANNACHARAJU, M et al. **Towards sustainable system configuration for the treatment of fish processing wastewater using bioreactors.** Environmental Science and Pollution Research, v. 27, n. 1, p. 353-365, 2020.

MAUER, C. E. S. **Estudo da compatibilidade da casca do arroz como veículo dissipador de bacillus sp num protótipo de lodos ativados para tratamento de esgoto doméstico.** Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul Escola De Engenharia Programa De Pós-Graduação Em Engenharia De Minas, Materiais E Metalúrgica, 2025.

MAJEED, Tanveer et al. **Characterization of a thermostable protease from Bacillus subtilis BSP strain.** BMC biotechnology, v. 24, n. 1, p. 49, 2024.

MANTOVAN, F. de M. et al. **Estudo da queima de lodo flotado de estação de tratamento de efluentes em caldeira a biomassa.** 2022.

MARAFON, A. C.; SANTIAGO, A. D.; AMARAL, A. F. C.; BIERHALS, A. N.; PAIVA, H. L. **Uso da Biomassa para a Geração de Energia,** 2016.

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

MELO, B. P. et al. **Caracterização físico-química de cultivares do sorgo para produção de bioenergia.** OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, v. 21, n. 5, p. 2410-2430, 2023.

MENECHINI, Cr. **Avaliação técnica e econômica da co-combustão de lodo frigorífico primário para geração de vapor.** In: VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Universidade do Oeste de Santa Catarina, Porto Alegre. 2015.

MONG, G. R. et al. **Pyrolysis of waste activated sludge from food manufacturing industry: Thermal degradation, kinetics and thermodynamics analysis.** Energy, v. 235, p. 121264, 2021.

MENG, L. et al. **Characterization and spoilage potential of Bacillus cereus isolated from farm environment and raw milk.** Frontiers in Microbiology, v. 13, p. 940611, 2022.

METCALF, L.; EDDY, H. P. Wastewater Engineering: **Treatment and Resource Recovery.** 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2016.

MURAKAMI, K. T. T. **Avaliação do consumo de água e da geração de efluentes em uma indústria de processamento de tilápias.** Universidade Estadual Paulista Júlio De Mesquita Filho, 2018.

NASCIMENTO, P. R. **Aplicação de enzimas celulase e hemicelulase comerciais degradadoras da parede celular vegetal na extração de óleo essencial de alecrim.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2024.

NETO, J. S. **Avaliação de estratégias para o aprimoramento do uso de recursos hídricos como fator impactante na produtividade do setor agroindustrial.** Universidade Presbiteriana Mackenzie, Centro de Ciências e Tecnologia, 2024.

NIELSEN, P.H.; NIELSEN, J.L. **Bacterial composition of activated sludge – importance for floc and sludge Properties.** Water Science and Technology Vol 49 No 10 pp 51–58 © IWA Publishing, 2004

NISHIMURA, A. S. **Avaliação da remoção dos macronutrientes nitrogênio e fósforo de efluente de abatedouro por fitorremediação.** Universidade Federal De Uberlândia Faculdade De Engenharia Ambiental Curso De Graduação Em Engenharia Ambiental, 2020.

NIMKANDE, V. D.; BAFANA, A. **A review on the utility of microbial lipases in wastewater treatment.** Journal of Water Process Engineering, v. 46, p. 102591, 2022.

NKOSI, N. V. **The food safety knowledge of street food vendors and the sanitary conditions of their street food vending environment in the Zululand District, South Africa.** Heliyon, v. 7, n. 7, 2021.

ODA, T. Y. R. **Valorização de lodo biológico e de lixiviado das cinzas da caldeira de recuperação de fábrica de celulose kraft para produção e aplicação de carvão ativado.** Doutor em Engenharia Civil, Viçosa - MG: Universidade Federal de Viçosa, 2021.

OLIVEIRA, P. H. S. **Influência da intensidade de aeração na formação do floco de lodo ativado e na eficiência de remoção de matéria orgânica.** Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.

PADILHA, J. et al. **Avaliação da potencialidade energética de lodos gerados no tratamento de efluentes de abatedouro e frigorífico de aves.** 2019.

PEREIRA, R. G. S. **Uma visão do tratamento de efluentes de uma indústria frigorífica.** Universidade Federal De Uberlândia, Instituto De Química, 2023.

PINTO, A. R. F.; GALVÃO, O. M. **Uma revisão da literatura brasileira sobre os métodos de custeio aplicados à piscicultura no Brasil.** Organizações Rurais & Agroindustriais, 2023.

PONTE, M. R. **Blendas de bagaço de cana-de-açúcar: caracterização das propriedades e investigação da viabilidade técnica.** Universidade Da Integração Internacional Da Lusofonia Afro-Brasileira Instituto De Engenharias E Desenvolvimento Sustentável Curso De Engenharia De Energias, 2017)

PROTÁSIO, T. P. **Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais.** Pesquisa florestal brasileira, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014.

RIBAS, A. B. **Avaliação da eletrocoagulação como tratamento de efluente proveniente de indústria de processamento de milho, com ênfase na remoção**

**de fósforo.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

RAMNATH, L., SITHOLE, B., GOVINDEN, R. **Identification of lipolytic enzymes isolated from bacteria indigenous to Eucalyptus wood species for application in the pulping industry.** Biotechnology Reports (Amst), v, 22, n. 15, p. 114-124, 2017.

RODRIGUES, E. M. G.; D'AMICO, C. C.; GERAGE, K. R. G. **Produção de celulases por fungos filamentosos utilizando fermentação em estado sólido.** Bioenergia em Revista: Diálogos (ISSN: 2236-9171), v. 13, n. 2, p. 32-44, 2023.

RODRIGUES, V. A. J. **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem.** 2010.

ROMANCE M. **Draft genome sequence of multidrug-resistant Kurthia gibsonii strain Hakim RU\_BHWE isolated from sewage water in Bangladesh.** 2024.

RODRIGUES, A. S. **Tratamento primário do efluente proveniente de uma indústria de abate de aves utilizando diferentes coagulantes.** Universidade Tecnológica Federal Do Paraná, 2023.

ROSA, M. S. **Avaliação do emprego de coagulantes orgânico e inorgânico no tratamento primário de efluente de abate e industrialização de aves.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

SANTIAGO, B. S. et al. **Produção de amilase por rizobactérias de Apuleia leiocarpa (Vogel) JF Macbr.** In: OPEN SCIENCE RESEARCH XII. Editora Científica Digital, 2023. p. 155-162.

SALGADO, C. A.; SANTOS, C. I. A.; VANETTI, M. C. D. Microbial lipases: **Propitious biocatalysts for the food industry.** Food Bioscience, v. 45, p. 101509, 2022.

SANCHÉZ, C. G. **Tecnologia de gaseificação de biomassa.** Campinas SP. Editora Átomo. 2010.

SANSINENEA, E. Bacillus spp.: **As plant growth-promoting bacteria. Secondary metabolites of plant growth promoting rhizomicroorganisms:** Discovery and applications, p. 225-237, 2019.

SANTIAGO, Beatriz Silva et al. Produção de amilase por rizobactérias de Apuleia leiocarpa (Vogel) JF Macbr. In: **OPEN SCIENCE RESEARCH XII.** Editora Científica Digital, 2023. p. 155-162.

SIERRA, G. A. **simple method for the detection of lipolytic activity of micro-organisms and some observations on the influence of the contact between cells and fatty substrates.** Antonie van Leeuwenhoek, v. 23, n. 1, p. 15-22, 1957.

STROHL, W. A.; ROUSE, H.; FISHER, B. D. **Microbiologia Ilustrada.** Porto Alegre: Artmed. 2004, 531 p.

SUBISSAY, H. K. **Determinação de temperatura ótima e pH ótimo das celulases produzidas por penicillium sp.** FSDE 15. 2022.

SCHATZMANN, H. C. *et al.* **Tratamento avançado de efluentes de frigorífico de aves e o reuso da água.** 2013.

SCHULZ, E. P. **Potencial de aproveitamento de lodo biológico como combustível em caldeiras.** Universidade Tecnológica Federal Do Paraná Bacharelado Em Engenharia Ambiental, 2019.

SILVA, C. L.; SERPA, E. C. S.; GRANDO, M. L. **Efluentes industriais provenientes de uma empresa beneficiadora de madeira.** Anais de Engenharia Química, v. 1, n. 1, p. 79-89, 2022.

SILVA, A. L. P. **Estudo comparativo do poder calorífico dos briquetes de biomassa: bagaço de cana, mesocarpo de coco e sabugo de milho, com adição de aglutinantes residuais.** 2023.

SIMADON, K. G. **Monitoramento de sistema de lodos ativados em efluente industrial por meio de análise microscópica relacionada a parâmetros operacionais.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, Programa de Pós-graduação em Biotecnologia, 2021.

SOUZA, M. A.; VIDOTTI, R. M.; OLIVEIRA NETO, A. L. **Redução no consumo de efluente gerado em abatedouro de tilápia do Nilo através da implantação de conceitos de produção mais limpa (P+ L).** Boletim do Instituto de Pesca, v. 34, n. 2, p. 289-296, 2008.

TOMAZ, L. S. S. **Proteases na indústria de alimentos: uma revisão acerca dos tipos, características e aplicações.** 2023.

TEATHER, R. N., WOOD, P. J. **Use of Congo Red-Polysaccharide Interactions in Enumeration and Characterization of Cellulolytic Bacteria from the Bovine Rumen.** Applied Environmental Microbiology, v. 43, p. 777-780, 1982.

THIELE, S. **Avaliação preliminar da degradação de celulose por isolados fúngicos do gênero Macrocybe coletados na região Noroeste do Estado do Paraná.** Monografia (graduação) - Universidade Federal do Paraná, Setor Palotina, Curso de Graduação em Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, 2021.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2012.

VON SPERLING, M. **Lodos ativados.** 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2014. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 4).

WANG, Y. *et al.* **Transcriptome of Kurthia gibsonii TYL-A1 Revealed the Biotransformation Mechanism of Tylosin.** Microorganisms, v. 12, n. 12, p. 2597, 2024.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Vol II. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2016. 211p.

XIANG, X. et al. **Microbial degradation mechanism and pathway of the insecticide thiamethoxam by isolated *Bacillus Cereus* from activated sludge**. Environmental Research, v. 246, p. 117929, 2024.