INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Minas Gerais
Campus Bambuí

PAULO HENRIQUE ALVES CASTELO BRANCO

AVALIAÇÃO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO NO PÓS-TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE FRIGORÍFICO AVÍCOLA

Bambuí/MG

2026

PAULO HENRIQUE ALVES CASTELO BRANCO

AVALIAÇÃO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO NO PÓS-TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS DE FRIGORÍFICO AVÍCOLA

Trabalho apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, *Campus* Bambuí.

Linha de Pesquisa: Tecnologias Ambientais.

Projeto Estruturante: Gestão de águas, efluentes e resíduos sólidos IV - Uso sustentável de recursos hídricos.

Orientadora: Profa. Dra. Sibele A. Ferreira Leite

Bambuí/MG

2026

Catalogação na Fonte Biblioteca IFMG - Campus Bambuí

C347a Castelo Branco, Paulo Henrique Alves.
Avaliação da flotação por ar dissolvido no pós-tratamento de águas residuárias de frigorífico avícola. / Paulo Henrique Alves Castelo Branco. – Bambuí, 2026.
125 f.: il.; color.

Orientadora: Dra. Sibele A. Ferreira Leite.
Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG, Curso Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, 2026.

1. Tratamento de efluentes. 2. Indústria avícola. 3. FAD. I. Leite, Sibele A. Ferreira. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG. III. Título.

CDD 628.35

Elaborada por Douglas Bernardes de Castro- CRB-6/2802

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Bambuí

PARECER Nº 11

FICHA DE APROVAÇÃO

Dissertação intitulada de **"Avaliação da flotação por ar dissolvido no pós-tratamento de águas residuárias de frigorífico avícola**", de autoria do mestrando em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental**, Paulo Henrique Alves Castelo Branco,** sob a orientação da prof. **Dra. Sibele Augusta Ferreira Leite**, aprovado pela Banca Examinadora de Defesa, em 13/07/2026, com a média de 85,0 pontos.

Bambuí (MG), 13 de julho de 2026.

Documento assinado eletronicamente por **Paulo Henrique Alves Castelo Branco**, **Usuário Externo**, em 17/07/2026, às 10:57, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **CARLOS FERNANDO LEMOS**, **Usuário Externo**, em 17/07/2026, às 11:01, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **BRENNO SANTOS LEITE**, **Usuário Externo**, em 17/07/2026, às 11:07, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **Sibele Augusta Ferreira Leite**, **Usuário Externo**, em 17/07/2026, às 11:09, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

Documento assinado eletronicamente por **FABIANE GOLDSCHMIDT ANTES**, **Usuário Externo**, em 20/07/2026, às 22:28, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs informando o código verificador **2812469** e o código CRC **6592D175**.

Criado por ronaldo.barbosa, versão 3 por ronaldo.barbosa em 17/07/2026 10:11:13.

AGRADECIMENTOS

A Deus,

À minha família, em especial, à minha mãe, Elaine, por todo amor, apoio e por sempre acreditar em mim.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* Bambuí, pela oportunidade de cursar o Programa de Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental (MPSTA).

À minha orientadora, Profa. Dra. Sibele Leite, pela orientação, apoio e ensinamentos ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Guilherme, pelo apoio, incentivo e parceria ao longo dessa jornada.

À empresa CostaFoods Brasil (Avivar Alimentos S/A), pela parceria, disponibilidade e apoio para a realização desta pesquisa.

À turma do mestrado, pela amizade, pela troca de experiências e pela parceria construída ao longo dessa jornada.

E a todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a execução deste estudo, o meu muito obrigado.

RESUMO

CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves, M.Sc., Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, julho de 2026. **Avaliação da flotação por ar dissolvido no pós-tratamento de águas residuárias de frigorífico avícola**. Orientadora: Sibele Leite

A indústria brasileira de abate e processamento de aves desempenha um papel estratégico na economia global, mas enfrenta o desafio ambiental do manejo de efluentes com elevadas cargas orgânicas, lipídicas e de nutrientes. O tratamento inadequado desses resíduos pode resultar no comprometimento da qualidade de corpos hídricos e em sanções legais, tornando a eficiência operacional um componente estratégico de competitividade. O objetivo geral deste trabalho foi analisar o desempenho de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) industrial, avaliando o impacto da implementação do Sistema de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) como etapa terciária de polimento e a eficiência das unidades operacionais ao longo do processo, visando assegurar a conformidade ambiental e a resiliência do sistema. A metodologia adotou uma abordagem mista, integrando uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) e um estudo de caso em escala real. O desempenho foi avaliado sob duas perspectivas: análise de parâmetros longitudinais entre 2019 e 2025, para contrastar os regimes Pré e Pós-FAD, e o monitoramento das unidades operacionais do sistema. A RSL foi conduzida mediante a prospecção e análise crítica de artigos científicos (2015-2025) em bases de dados especializadas (*Scopus*, *Web of Science*, SciELO e *Google Scholar*) para fundamentar o estado da arte e o uso da tecnologia. Para o estudo de caso, os dados foram coletados entre os anos 2019 e 2025 na Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) industrial localizada em São Sebastião do Oeste, MG, para avaliar a eficiência do FAD, seguido de uma coleta de dados entre abril de 2024 e julho de 2025, para uma visão geral do processo. Alguns dos parâmetros analisados foram DBO, DQO, fósforo total, nitrogênio amoniacal, sólidos suspensos totais (SST) e pH. Empregaram-se estatística descritiva e testes inferenciais não paramétricos (*Wilcoxon-Mann-Whitney* e *Kruskal-Wallis*) com nível de significância de 5%. Os principais resultados demonstraram que a implantação do FAD, em 2021, resultou em estabilização do descarte final, mesmo sob uma vazão média 44% superior e com menor variabilidade hidráulica. As eficiências médias de remoção de DBO e DQO aumentaram para 97,6% e 97,0%, respectivamente, com a DBO final atingindo a mediana de 17,7 mg/L. O sistema removeu mais de 98% dos sólidos suspensos totais (SST) residuais das lagoas aeradas, reduzindo a mediana final para 18,0 mg/L. Além disso, a eficiência de remoção de fósforo total foi elevada para 69,5%, demonstrando resiliência frente ao dobro da concentração de carga afluente no período. A discussão integrativa entre os dados obtidos no estudo de caso e a RSL revelou a existência do "desempenho biológico em níveis insatisfatórios" entre o reator anaeróbio (2LA) e o afluente do flotador (4FT), em que as remoções parciais de DBO estagnaram entre 20% e 26%. Esse cenário evidencia que o FAD atua como uma barreira importante, processando cargas orgânicas brutas que deveriam ter sido degradadas nas etapas biológicas precedentes. Conclui-se que, embora a tecnologia FAD seja determinante para garantir a conformidade legal e a qualidade final do efluente (conforme resoluções CONAMA 357 e 430), o sistema apresenta vulnerabilidade estrutural. É imperativo otimizar o tempo de detenção hidráulica e a aeração das lagoas biológicas para evitar a saturação da unidade físico-química e assegurar a sustentabilidade ambiental da planta no longo prazo.

Palavras-chave: Tratamento de efluentes; Indústria avícola; FAD; Eficiência de remoção.

ABSTRACT

CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves, M.Sc., Federal Institute of Education, Science and Technology of Minas Gerais, july 2026. **Evaluation of dissolved air flotation in the post-treatment of wastewater from a poultry slaughterhouse.** Advisor: Sibele Leite.

he Brazilian poultry slaughtering and processing industry plays a strategic role in the global economy but faces the environmental challenge of managing wastewater with high organic, lipid, and nutrient loads. Inadequate treatment of this wastewater may compromise the quality of water bodies and result in legal sanctions, making operational efficiency a strategic component of competitiveness. The general objective of this study was to analyze the performance of an industrial Wastewater Treatment Plant (WWTP), assessing the impact of implementing a Dissolved Air Flotation (DAF) system as a tertiary polishing step and the efficiency of the operational units throughout the process, with the aim of ensuring environmental compliance and system resilience. The methodology adopted a mixed-methods approach, integrating a Systematic Literature Review (SLR) and a full-scale case study. Performance was assessed from two perspectives: a longitudinal analysis of parameters from 2019 to 2025 to compare the pre- and post-DAF operating regimes, and monitoring of the system's operational units. The SLR was conducted through the identification and critical analysis of scientific articles published between 2015 and 2025 and indexed in specialized databases, namely Scopus, Web of Science, SciELO, and Google Scholar, to provide a foundation for the state of the art and the use of this technology. For the case study, data were collected from 2019 to 2025 at an industrial Wastewater Treatment Plant (WWTP) located in São Sebastião do Oeste, Minas Gerais, Brazil, to evaluate DAF efficiency, followed by data collection from April 2024 to July 2025 to provide an overview of the process. Some of the parameters analyzed were biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), total phosphorus, ammoniacal nitrogen, total suspended solids (TSS), and pH. Descriptive statistics and nonparametric inferential tests, namely the Wilcoxon–Mann–Whitney and Kruskal–Wallis tests, were applied at a 5% significance level. The main results demonstrate that the implementation of DAF in 2021 resulted in the stabilization of the final discharge, even under an average flow rate that was 44% higher and exhibited lower hydraulic variability. The average BOD and COD removal efficiencies increased to 97.6% and 97.0%, respectively, with the final BOD reaching a median concentration of 17.7 mg/L. The system removed more than 98% of the residual total suspended solids (TSS) from the aerated lagoons, reducing the final median concentration to 18.0 mg/L. In addition, the total phosphorus removal efficiency increased to 69.5%, demonstrating resilience despite a twofold increase in the influent load concentration during the period. The integrative discussion of the data obtained from the case study and the systematic literature review (SLR) revealed unsatisfactory biological performance between the anaerobic reactor effluent (2LA) and the dissolved air flotation influent (4FT), with partial BOD removal efficiencies remaining between 20% and 26%. This scenario demonstrates that DAF acts as an important barrier by processing raw organic loads that should have been degraded during the preceding biological treatment stages. It is concluded that, although DAF technology is essential for ensuring legal compliance and final effluent quality, in accordance with CONAMA Resolutions No. 357 and No. 430, the system exhibits structural vulnerability. It is imperative to optimize the hydraulic retention time and aeration of the biological lagoons to prevent saturation of the physicochemical treatment unit and ensure the long-term environmental sustainability of the plant.

Keywords: Effluent treatment; Poultry industry; DAF system; Removal efficiency.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros para o dimensionamento de lagoas anaeróbias. 30
Tabela 2 - Parâmetros para o dimensionamento de lagoas aeradas. 31
Tabela 3 - Parâmetros para o dimensionamento de lagoas facultativas. 33
Tabela 4 - Parâmetros para o dimensionamento de lagoas de maturação. 34
Tabela 5 - Parâmetros exigidos pela Resolução CONAMA n.° 430/2011. 41
Tabela 6 - Dimensões do Flotador Estudado. 50
Tabela 7 - Dimensões da lagoa anaeróbia 54
Tabela 8 - Dimensões da Primeira Lagoa Aeróbia 55
Tabela 9 - Dimensões da Segunda Lagoa Aeróbia 55
Tabela 10 - Síntese da estatística descritiva e inferencial das concentrações nos efluentes e eficiências de remoção nos períodos Pré e Pós-FAD 78
Tabela 11 - Comportamento da temperatura da amostra, ar e vazão nos períodos Pré-FAD e Pós-FAD 94
Tabela 12 - Média, desvio-padrão e mediana da concentração de DBO, N, SST e pH, em função das diferentes etapas do sistema de tratamento de efluentes. 95

LISTA DE FIGURAS, FLUXOGRAMAS E GRÁFICOS

Figura 1 - Sistema de tratamento de flotação por ar dissolvido..... 26
Figura 2 - Flotação por ar dissolvido (FAD). 27
Figura 3 - Mapa da área de estudo 44
Fluxograma 1 - Processo da ETE em estudo 47
Figura 4 - Peneiras estáticas do sistema estudado. 48
Figura 5 - Calha Parshall 49
Figura 6 - Flotador primário do sistema estudado. 50
Figura 7 - Flotador primário e peneiras. 51
Figura 8 - Tridecanter e tanque de cozimento. 52
Figura 9 - Lagoa anaeróbia 53
Figura 10 - Primeira lagoa aeróbia. 53
Figura 11 - Segunda lagoa aeróbia 53
Figura 12 - Flotador por ar dissolvido. 56
Figura 13 - Saída do flotador por ar dissolvido. 57
Figura 14 - Lagoa clarificada 57
Figura 15 - Lançamento ao corpo receptor. 58
Fluxograma 2 - Etapas e pontos de coleta da ETE em estudo 59
Figura 16 - Análises de amostras para determinação da DBO em laboratório 61
Gráfico 1 - Concentração de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 82
Gráfico 2 - Concentração de demanda química de oxigênio (DQO) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 83
Gráfico 3 - Concentração de fósforo total (P) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 84
Gráfico 4 - Concentração de nitrogênio amoniacal (N) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 86
Gráfico 5 - Concentração de óleos e graxas (O&G) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 87
Gráfico 6 - Concentração de sólidos suspensos (SS) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 89
Gráfico 7 - Concentração de sólidos suspensos totais (SST) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 90
Gráfico 8 - Concentração de sódio (Na) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 91
Gráfico 9 - Concentração de sulfetos (SUF) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 93
Gráfico 10 - Variação de pH nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 94
Gráfico 11 - Comportamento da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) nas diferentes unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 96
Gráfico 12 - Comportamento do nitrogênio amoniacal total (N) nas diferentes unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 98
Gráfico 13 - Comportamento das concentrações de sólidos suspensos totais (SST) nas diferentes unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 99
Gráfico 14 - Comportamento do pH nas diferentes unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas. 101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros estabelecidos para tratamento de efluentes da indústria avícola..... 17
Quadro 2 - Níveis de tratamento. 19
Quadro 3 - Codificação e descrição das unidades operacionais da estação de tratamento de efluentes (ETE) 47
Quadro 4 - Variáveis monitoradas do sistema de tratamento no período Pré-FAD (2019-2020) e Pós-FAD (2021-2025) e nas unidades operacionais..... 60
Quadro 5 - Apresentação do título, objetivos e resultados principais dos trabalhos encontrados a partir da Revisão Sistemática de Literatura (RSL) 65
Quadro 6 - Síntese do diagnóstico operacional, eficiências e propostas de melhoria para as etapas de tratamento. 102

LISTA DE ABREVIATURAS

DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EC	Eletrocoagulação
ESG	*Environmental, Social and Governance*
ETEs	Estações de Tratamento de Efluentes
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
P	Fósforo
N	Nitrogênio amoniacal
OG	Óleos e graxas
PAC	Policloreto de alumínio
UASB	Reatores anaeróbios de fluxo ascendente
LA	Sistemas de lodo ativado
Na	Sódio
SS	Sólidos sedimentares
SST	Sólidos suspensos totais
SUF	Surfactantes amoniacais
T	Temperatura
T_ar	Temperatura do ar
TRH	Tempo de retenção hidráulica
V	Vazão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12
2. OBJETIVOS 16
2.1. Objetivo Geral 16
2.2. Objetivos Específicos 16
3. REFERENCIAL TEÓRICO 17
3.1 Geração de efluentes pela indústria avícola 17
3.1.1 Águas residuárias geradas pelo abate e processamento de aves 17
3.1.2 Características físico-químicas dos efluentes oriundos da indústria avícola 18
3.2 Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) 18
3.2.1 Tratamento Preliminar dos Efluentes Industriais 19
3.2.2 Tratamento Primário dos Efluentes Industriais 21
3.2.3 Tratamento Secundário dos Efluentes Industriais 28
3.2.4 Lagoas de Estabilização 29
3.2.5 Sistemas de Lodo Ativado (LA) 35
3.2.6 Tratamento Terciário 37
4 METODOLOGIA 43
4.1 Natureza da Pesquisa 43
4.2 Revisão Sistemática de Literatura 43
4.3 Estudo de Caso 44
4.3.1 Descrição Geral da ETE 44
4.3.2 Detalhamento Operacional dos Processos da ETE 47
4.4 Análises Estatísticas 62
4.5 Elaboração do Procedimento Operacional Padrão (POP) para o sistema FAD 63
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 65
5.1 Síntese de evidências da Revisão Sistemática de Literatura (RSL). 66
5.2 Análises de desempenho do sistema: Impacto da Implementação do FAD 77
5.3 Análises de eficiência por unidade operacional: efeito das etapas do tratamento 95
6 CONCLUSÃO 101
REFERÊNCIAS 102
APÊNDICE – PRODUÇÃO TÉCNICA E TECNOLÓGICA (PTT) PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO (POP) 106
ANEXO - TERMO DE PARCERIA 123

1. INTRODUÇÃO

A indústria de abate e processamento de aves desempenha papel estratégico na economia agroindustrial brasileira, sendo uma das principais fornecedoras de proteína animal para o consumo humano. Sua estrutura abrange toda a cadeia produtiva, da criação das aves ao processamento, distribuição e comercialização de produtos *in natura* e industrializados (Costa *et al.*, 2018). Como parte do setor agroindustrial, essa cadeia conecta o meio rural ao mercado, promove agregação de valor e impulsiona inovações tecnológicas voltadas à qualidade dos alimentos (Batalha, 2021).

O Brasil destaca-se como potência global no segmento avícola. Desde 2021, o país lidera esse mercado, com variações positivas em sua participação, que atingiu o pico de 23,8% em 2023. Em 2024, o Brasil manteve-se como o maior exportador mundial, com um volume estimado de 4,7 milhões de toneladas, representando 21,6% do total global (FAO, 2024).

A atividade também se destaca pela capacidade de geração de emprego e renda. Em 2023, os setores vinculados à agropecuária ampliaram em 36.255 os vínculos formais de trabalho, e o número de estabelecimentos empregadores cresceu em mais de 3 mil unidades (RAIS, 2023). A indústria de aves, especificamente, empregava 261.045 trabalhadores em maio de 2023, demonstrando sua relevância social e econômica (Brasil, 2023; Güths *et al.*, 2018).

O rápido crescimento da avicultura ampliou significativamente a geração de águas residuárias no abate de aves, com elevadas cargas orgânicas e de nutrientes, contendo materiais como sangue, gorduras, penas, restos de ração e substâncias químicas utilizadas na higienização. Quando lançados de forma inadequada, esses resíduos comprometem a qualidade dos corpos hídricos, intensificam processos de eutrofização e reduzem o oxigênio dissolvido, gerando desequilíbrios ecológicos (Von Sperling, 2014; Oliveira *et al.*, 2020).

Além das consequências ambientais, o gerenciamento inadequado das águas residuárias provoca riscos econômicos e sociais. Empresas que não tratam corretamente seus resíduos tornam-se vulneráveis a multas, processos legais e restrições comerciais, especialmente porque mercados importadores têm aumentado as exigências de conformidade ambiental e rastreabilidade (Padilha, 2021; Carmo; Silva, 2020; Ferreira *et al.*, 2024). Nesse contexto, o tratamento eficiente de efluentes deixa de ser apenas uma obrigação legal e se torna um componente estratégico de competitividade.

Dado o potencial poluidor dos resíduos avícolas e sua complexidade físico-química, torna-se indispensável a adoção de sistemas capazes de remover, de maneira eficaz, sólidos, matéria orgânica, óleos e graxas, a fim de garantir proteção ambiental e atendimento às normas

regulatórias (Sanágua, 2014; Baldissera, 2009; Coelho, 2014).

As tecnologias de pré-tratamento e pós-tratamento químico e físico, como o processo Fenton-Coagulação (Almeida *et al.*, 2015; Frigulio, 2023) e a flotação por ar dissolvido (FAD) (Papp, 2017; Corso, Papp & Mees, 2019), se mostram alternativas para reduzir a carga orgânica e poluentes refratários, potencializando o desempenho das etapas biológicas subsequentes. Alguns autores, como Oliveira *et al.* (2020) e Von Sperling (2017), destacam que tecnologias avançadas de tratamento, como o FAD, são fundamentais para complementar sistemas convencionais que nem sempre conseguem remover, sozinhos, os poluentes específicos presentes nos efluentes avícolas.

Além do FAD, outros métodos de pós-tratamento de efluentes podem ser citados como os mais comumente utilizados, como os processos por membranas (Von Sperling, 2017; Metcalf; Eddy, 2014), a osmose reversa (Singh *et al.*, 2023) e os processos de oxidação avançada tratados (Almeida *et al.*, 2015; Von Sperling, 2017), os quais apresentam elevada eficiência na remoção de contaminantes residuais e no polimento final do efluente. A escolha do pós-tratamento deve considerar diferentes métodos, de forma integrada, visando à eficiência, ao atendimento à legislação ambiental e à viabilidade técnico-econômica.

A demanda por tratamento avançado decorre principalmente da elevada carga orgânica e da presença de frações não biodegradáveis e de nutrientes residuais, que exigem tecnologias de polimento, como FAD, membranas, osmose reversa ou processos de oxidação avançada, para garantir o atendimento aos padrões de lançamento estabelecidos pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (Brasil 2011; 2015), reduzir impactos ambientais e viabilizar, em alguns casos, o reúso industrial do efluente tratado.

O FAD atua por meio da injeção de microbolhas que aderem aos flocos e promovem sua ascensão, favorecendo a separação eficiente de sólidos suspensos, gorduras e materiais decantáveis (Oliveira *et al.*, 2020).

Além da eficiência ambiental, o FAD apresenta vantagens operacionais e econômicas relevantes, especialmente quando aplicado de forma integrada a sistemas biológicos. Um exemplo dessa integração foi observado no tratamento de efluentes de abatedouros, onde a utilização do FAD como pré-tratamento antes de um reator UASB reduziu a carga de óleos e graxas, garantindo estabilidade operacional e auxiliando o sistema a atingir remoções de até 97,9% de DQO e 98,6% de DBO. Adicionalmente, a implementação de uma unidade de FAD químico como polimento final (terciário) foi decisiva para reduzir a DBO de 2.100 mg/L para aproximadamente 28 mg/L, garantindo o pleno atendimento aos padrões legais de lançamento (Del Nery *et al.*, 2016).

Outros benefícios do FAD relatados na literatura são a recuperação e o direcionamento de lodo flotado, rico em matéria orgânica e lipídios, podendo ser utilizado para aproveitamento energético ou industrial, contribuindo para a redução de custos com descarte e alinhando o processo aos princípios da economia circular. O FAD possibilita reúso de até 50% da água tratada, reforçando sua viabilidade técnico-econômica como tecnologia estratégica no tratamento terciário de efluentes industriais com elevadas cargas de óleos e graxas (Silva *et al.*, 2020; Del Nery *et al.*, 2016).

A discussão sobre sistemas de tratamento aplicados a frigoríficos avícolas envolve a necessidade de conciliar altos níveis de produtividade com responsabilidade socioambiental. A escolha e o monitoramento das tecnologias utilizadas determinam a eficiência do tratamento e o impacto final sobre a cadeia produtiva (Sanágua, 2014). Compreender como tecnologias como o FAD se comportam em condições reais de operação torna-se essencial para reduzir lacunas existentes na literatura. Embora amplamente utilizado em outros segmentos, ainda há discussões sobre sua efetiva aplicabilidade e desempenho na avicultura industrial, o que reforça a importância de pesquisas que avaliem sua eficiência em contextos específicos.

Considerando os desafios inerentes ao tratamento de efluentes provenientes da indústria de abate e processamento de aves, formula-se a hipótese de que a aplicação do Sistema FAD como etapa de tratamento terciário, subsequente aos reatores aeróbicos, produz uma redução significativa nas concentrações de sólidos suspensos totais (SST), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio amoniacal e demais poluentes avaliados, em comparação às etapas anteriores do processo. Adicionalmente, postula-se que a eficiência observada no FAD resulta em melhoria mensurável da qualidade do efluente final, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais e para a sustentabilidade operacional do sistema de tratamento industrial.

A relevância deste estudo fundamenta-se na necessidade de aprimorar o desempenho dos sistemas de tratamento em frigoríficos avícolas, cujos processos geram efluentes com concentrações de DBO, DQO, sólidos e óleos frequentemente superiores à capacidade dos métodos convencionais isolados. Embora o FAD seja consolidado como pré-tratamento em diversos segmentos, ainda há uma lacuna literária e discussões sobre sua efetiva aplicabilidade e desempenho sistemático como etapa terciária em frigoríficos avícolas, sobretudo no que tange ao atendimento simultâneo às Resoluções CONAMA n.º 357/2005 e n.º 430/2011. Ao avaliar o FAD como tecnologia complementar e estratégica para a remoção de sólidos finos, frações lipídicas e polimento final, esta pesquisa busca preencher essa lacuna operacional e científica, fornecendo subsídios técnicos para a tomada de decisão e para a melhoria da sustentabilidade e

conformidade ambiental do setor.

Do ponto de vista social e econômico, investir em sistemas de tratamento eficazes significa não apenas atender à legislação, mas também melhorar a imagem institucional das empresas junto aos consumidores e ao mercado externo, em que as exigências ambientais são cada vez mais rigorosas (ABPA, 2023). O fortalecimento da agenda *Environmental, Social and Governance* (ESG) na indústria de alimentos reforça a importância de práticas sustentáveis para a manutenção da competitividade global; logo, a relevância deste estudo está associada a essa necessidade de aprimorar a eficiência do tratamento de efluentes na indústria avícola.

Do ponto de vista da sustentabilidade, o manejo adequado de resíduos ganha relevância crescente no contexto das políticas globais de desenvolvimento sustentável. Em especial, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (GCB, 2020) estabelecem diretrizes essenciais para enfrentar desafios contemporâneos relacionados à gestão ambiental, produção agrícola, saúde humana e economia circular. Este estudo dialoga diretamente com o ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ao abordar o tratamento e o reaproveitamento seguro de resíduos derivados do saneamento básico; com o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), por incentivar práticas de valorização de resíduos e redução do impacto ambiental; e com o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), ao considerar práticas que contribuem para o aumento de carbono no solo e mitigação da emissão de gases de efeito estufa. Assim, a pesquisa reforça o compromisso com a sustentabilidade sistêmica, aproximando-se de debates contemporâneos sobre bioeconomia, ciclos fechados de nutrientes, resiliência socioambiental e inovação tecnológica para a gestão responsável dos recursos naturais.

Logo, para atender aos objetivos da dissertação e do programa de mestrado, este trabalho foi organizado em três partes: a primeira, intitulada "Referencial Teórico", apresenta a fundamentação conceitual e técnica, com ênfase nos sistemas de tratamento mais utilizados atualmente nesse setor; a segunda, "Metodologia", descreve de forma detalhada os procedimentos metodológicos adotados, contemplando tanto a revisão sistemática da literatura (RSL) quanto o estudo de caso realizado; e a terceira é dedicada à apresentação e discussão dos resultados, incluindo os achados da revisão sistemática e as análises provenientes do estudo de campo. Por fim, os resultados obtidos ao longo da pesquisa servirão de base para a elaboração de uma ou mais publicações em periódicos científicos, além da criação de um produto técnico-tecnológico (PTT), consistente na elaboração de um Procedimento Operacional Padrão (POP), com o objetivo de contribuir para a padronização da operação do sistema de flotação por ar dissolvido (FAD), conforme os resultados alcançados nesta pesquisa.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar o desempenho de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) de abatedouro avícola, avaliando o impacto da implementação do Sistema de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) no pós-tratamento e a eficiência das unidades operacionais ao longo do processo, visando assegurar a conformidade ambiental e a resiliência do sistema.

2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos incluíram:

a) Realizar uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) para prospectar evidências científicas sobre o uso da Flotação por Ar Dissolvido (FAD) como tecnologia de polimento terciário, estabelecendo os parâmetros teóricos de desempenho que servirão de base para a análise dialética com os dados de campo;
b) Contrastar o desempenho histórico da ETE entre os regimes operacionais Pré-FAD (2019-2020) e Pós-FAD (2021-2025);
c) Avaliar a eficiência individual e integrada das etapas de tratamento (da água residuária ao efluente tratado), a fim de identificar possíveis detalhes operacionais, correlacionando o comportamento das variáveis DBO, Nitrogênio, SST e pH ao longo do fluxo do processo;
d) Elaboração de um Procedimento Operacional Padrão (POP) para padronização da operação do sistema FAD.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Geração de efluentes pela indústria avícola

A indústria avícola, parte essencial do agronegócio global, gera volumes expressivos de resíduos em função do elevado ritmo de produção e abate de aves, bem como da diversidade de etapas envolvidas no processamento. Segundo Zimina *et al.* (2022), o setor produz efluentes líquidos, excrementos, penas, carcaças e vísceras, entre outros subprodutos que demandam manejo especializado para prevenir impactos ambientais severos.

Entre esses resíduos, destacam-se a água de lavagem, geralmente rica em carga orgânica, gorduras, sangue e sólidos suspensos (SS), o que reforça a necessidade de tratamentos adequados em Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) (Jayathilakan *et al.*, 2011; Seidavi *et al.*, 2018). Quando descartados de forma inadequada, esses resíduos podem contaminar o solo e os corpos d'água, subterrâneos e superficiais, além de favorecer a proliferação de patógenos e a emissão de gases nocivos, como metano e amônia. Tais processos intensificam a degradação ambiental e ampliam os riscos à saúde pública (Ungureanu *et al.,* 2022).

Diante desse cenário, o tratamento de resíduos e efluentes industriais avícolas configura-se como uma atividade complexa que envolve a adequação dos processos às características das matérias-primas, às etapas produtivas e às condições técnicas e financeiras disponíveis. Ainda assim, trata-se de uma etapa indispensável para a mitigação da poluição e para a garantia da sustentabilidade ambiental. O manejo eficiente dos efluentes é fundamental para a proteção da saúde de seres vivos potencialmente expostos a toxinas industriais, sobretudo quando estes contaminantes podem atingir rios e outros corpos hídricos (Mierzwa, 2002).

3.1.1 Águas residuárias geradas pelo abate e processamento de aves

O processamento industrial de aves é uma atividade que exige consumo hídrico constante para assegurar padrões de segurança alimentar, resultando na geração contínua de efluentes complexos (Batalha, 2021; Silva *et al.*, 2010). A natureza desses resíduos é determinada pelas etapas produtivas, que incluem desde a recepção e insensibilização até o resfriamento e embalagem das carcaças (Olivo, 2006; Silva *et al.*, 2010).

Essas operações agregam aos resíduos altas concentrações de gorduras, proteínas, fragmentos de tecidos e resíduos químicos de higienização. A etapa de sangria é identificada como um ponto crítico de controle: a coleta segregada do sangue pode reduzir entre 50% e 70%

a carga orgânica da água residuária, facilitando o desempenho das unidades de tratamento subsequentes (FEAM, 2010).

A gestão desses efluentes é regida por normativas rigorosas, visto que o lançamento inadequado compromete a qualidade dos corpos hídricos e a conformidade legal da indústria (Brasil, 2011; Padilha, 2021). Os parâmetros fundamentais para o descarte são estabelecidos pelas Resoluções CONAMA n.º 357/2005 e n.º 430/2011, que definem as condições de lançamento e os padrões de qualidade para os corpos receptores, conforme sintetizado no Quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros estabelecidos para tratamento de efluentes da indústria avícola

PARÂMETROS		
Características	**Resolução CONAMA n.º 357/2005**	**Resolução CONAMA n.º 430/2011**
Objetivo principal da resolução	Define classes de corpos de água e parâmetros de qualidade.	Estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes.
pH	Variável conforme classe da água (6,0 – 9,0).	Entre 5,0 e 9,0 no efluente lançado.
Temperatura	Variação máxima de 3 °C no corpo receptor.	Máximo 40 °C no efluente e variação ≤ 3 °C no corpo hídrico.
DBO_5 (20 °C)	Define valores máximos por classe.	Exige remoção mínima de 60% da carga orgânica afluente.
Materiais sedimentáveis	Não devem comprometer o uso do corpo d'água, sem valor numérico fixo.	≤ 1 mL/L em cone Imhoff (1h); ausentes em lagos/lagoas.
Óleos e graxas	Não devem produzir películas visíveis na água.	Limite numérico → 20 mg/L (minerais) e 50 mg/L (animais/vegetais).
Materiais flutuantes	Não devem estar presentes em quantidades que prejudiquem a qualidade.	Ausência obrigatória no efluente.
Metais pesados e tóxicos	Valores máximos tabelados (ex.: Cd, Pb, Hg, As, etc.).	Remete a 357/2005 para limites específicos.
Nutrientes (N e P)	Limites conforme classe da água (para prevenir eutrofização).	Remete a 357/2005; pode exigir remoção adicional conforme órgão ambiental.
Vazão de lançamento	Não especifica.	Máximo de 1,5 × a vazão média do agente poluidor.

Fonte: Brasil (2005/2011)

O cumprimento desses limites é essencial para a estratégia de sustentabilidade e competitividade do setor, integrando o planejamento operacional e orçamentário das empresas para assegurar a conformidade com as exigências dos órgãos ambientais (Andrade Junior,

2017).

3.1.2 Características físico-químicas dos efluentes oriundos da indústria avícola

Os efluentes avícolas possuem composição complexa e altamente poluente, reconhecidos pela alta carga orgânica e de nutrientes (Fatima *et al.*, 2021; Yaakob *et al.*, 2018). O Oxigênio Dissolvido (OD) é criticamente baixo, com valores frequentemente inferiores a 1,0 mg/L, reforçando a elevada demanda bioquímica desse resíduo (AL-Gheethi *et al.*, 2015; Epa, 1973).

A concentração, expressa pela DBO e DQO, apresenta valores históricos de 398 mg/L e 460 mg/L (EPA, 1973), mas pesquisas atuais indicam concentrações que atingem até 2.543 mg/L para DBO (Bazrafshan *et al.*, 2012; Yaakob *et al.*, 2018) e 7.719 mg/L para DQO (Yaakob *et al.*, 2018). Os Sólidos Suspensos Totais (SST) podem superar 5.000 mg/L (Yaakob *et al.*, 2018), enquanto os Óleos e Graxas (O&G), tradicionalmente críticos, atingem até 3.616 mg/L (Aziz *et al.*, 2018; Bazrafshan *et al.*, 2012). Nutrientes como Nitrogênio (56 a 564 mg/L) e Fósforo (7 a 50 mg/L) representam riscos elevados de eutrofização, tornando o tratamento biológico acoplado a tecnologias como a flotação por ar dissolvido (FAD) indispensável para o atendimento legal (Yaakob *et al.*, 2018; Njoya *et al.*, 2019; Bustillo-Lecompte; Mehrvar, 2017).

3.2 Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs)

As ETEs industriais operam por meio da integração de processos físicos, químicos e biológicos para mitigar os impactos ambientais. A concepção dessas unidades baseia-se na natureza do metabolismo microbiano empregado, sendo classificadas em sistemas aeróbios (com oxigênio) ou anaeróbios (na ausência de oxigênio) (Ferreira *et al.*, 2024; Von Sperling, 2017).

Enquanto sistemas aeróbios garantem degradação rápida da carga orgânica, os anaeróbios permitem a produção de biogás e operam com menor custo energético (Santos *et al.*, 2011; Von Sperling, 2017). A gestão eficiente exige que essas tecnologias sejam organizadas em níveis progressivos, conforme o Quadro 2.

Quadro 2 - Níveis de tratamento

Nível de tratamento	Objetivo de remoção	Exemplos de aplicação
Preliminar	Remoção de sólidos grosseiros (penas, vísceras, fragmentos de ração)	Gradeamento, peneiramento, caixas de areia
Primário	Redução de sólidos suspensos e parte da matéria orgânica	Sedimentação, flotação por ar dissolvido, coagulação/floculação
Secundário	Remoção da matéria orgânica solúvel e nutrientes	Lodos ativados, lagoas aeradas, reatores anaeróbios (UASB, SBR)
Terciário	Remoção de nutrientes (N e P), patógenos e compostos recalcitrantes	Cloração, radiação UV, ozonização, precipitação química, membranas filtrantes

Fonte: Adaptado de Von Sperling (1996), Sanágua (2014), Ribeiro *et al.* (2019), Carmo e Silva (2020).

3.2.1 Tratamento Preliminar dos Efluentes Industriais

Segundo Von Sperling (1996), ao incorporar os processos químicos e biológicos às operações unitárias correspondentes, de maneira sistemática, obtêm-se os sistemas de tratamento de efluentes líquidos nos estágios preliminar, primário, secundário e terciário. Estes devem ser planejados levando-se em consideração critérios geográficos, como a topografia e o tipo de solo, as dimensões e o tipo de indústria, seus custos relacionados, as características operacionais, como a quantidade de efluente liberado, e outras questões ambientais (Metcalf; Eddy, 2016).

A primeira fase da operação de tratamento é focada na remoção de sólidos de dimensões significativas. Tais sólidos grosseiros podem ser prontamente retirados do processo industrial mediante operações como as de separação via peneiras e grades, sendo que areias e gorduras também podem ser removidos por desarenação e outras formas de retenção grosseira (Metcalf; Eddy, 2016). A etapa de gradeamento envolve a retenção de sólidos de maior tamanho por meio de barras dispostas na direção transversal ao fluxo do efluente. Em seguida, os sólidos grosseiros retidos são eliminados por meio de métodos de raspagem. No caso de efluentes resultantes do abate de aves, os sólidos grosseiros são majoritariamente compostos por penas, areia e fezes (Olivo, 2006).

Para sólidos de granulometria intermediária, geralmente superiores a 0,25 mm, a utilização de peneiras constitui uma etapa essencial no pré-tratamento de efluentes industriais. Essas peneiras podem ser estáticas, quando o efluente passa por uma superfície fixa filtrante, ou rotativas, em que a movimentação da malha facilita a retenção dos sólidos e evita seu

acúmulo excessivo (Nunes, 2012). O dimensionamento dessas operações unitárias deve considerar a máxima vazão de projeto, característica que varia de acordo com o tipo de indústria, o volume de efluente gerado e a composição sólida presente. PAREI

A escolha do tipo de peneira está diretamente relacionada ao volume de efluente e ao grau de remoção desejado, utilizando a malha adequada. Peneiras com malhas mais finas permitem a retenção de partículas menores, aumentando a remoção de sólidos e, consequentemente, reduzindo a carga orgânica do efluente antes de processos subsequentes, como coagulação, floculação e tratamento biológico (Nunes, 2012). A seleção da malha deve equilibrar a eficiência de remoção e a capacidade de fluxo, evitando que partículas menores passem pelo sistema e causem sobrecarga nas etapas seguintes. Malhas com dimensões entre 0,5 e 0,75 mm são comumente empregadas, sendo adequadas para reter a maior parte dos sólidos presentes nos efluentes dessa indústria (Olivio, 2006). A utilização correta das peneiras protege bombas, válvulas e tubulações contra entupimentos, abrasão e desgastes prematuros, contribuindo para a redução de custos de manutenção e para maior durabilidade dos equipamentos.

Nunes (2012) complementa, afirmando que o dimensionamento das peneiras, seja estática ou rotativa, deve levar em conta a taxa de aplicação do efluente, isto é, o volume por unidade de área da malha, para evitar sobrecarga e garantir eficiência operacional. Em peneiras rotativas, a movimentação da malha permite autolimpeza parcial, prevenindo acúmulo excessivo de sólidos e mantendo fluxo contínuo. Já as peneiras estáticas, embora mais simples, podem requerer intervenções periódicas para remoção dos sólidos acumulados, sendo mais indicadas para efluentes com menor concentração de sólidos.

A remoção preliminar de sólidos reduz a necessidade de produtos químicos nas etapas de coagulação e floculação, melhora a eficiência de sedimentação em tanques posteriores e diminui a carga sobre os sistemas biológicos, resultando em efluentes com menor turbidez, DBO e DQO. Dessa forma, a integração adequada das peneiras no fluxo de tratamento permite otimizar a operação, reduzir custos e minimizar impactos ambientais, especialmente em indústrias que geram efluentes com elevada concentração de sólidos e materiais orgânicos (Nunes, 2012).

Substâncias menos densas que a água, como óleos e graxas, e certos compostos orgânicos em suspensão, requerem métodos específicos de separação, geralmente realizados em caixas separadoras. Estas podem operar por gravidade ou por flotação, dependendo das características físico-químicas do efluente (Jordão; Pessoa, 2017). Nos tanques de separação por gravidade, a diferença de densidade permite que os óleos ascendam à superfície, enquanto

os sólidos mais leves permanecem suspensos ou sedimentam lentamente. A presença de chicanas ou defletores nos tanques, conforme descrito por Metcalf e Eddy (2016), contribui para a eficiência do processo, aumentando o tempo de detenção hidráulica e favorecendo a sedimentação e a separação de camadas, sem gerar turbulência excessiva que possa reincorporar os materiais separados ao fluxo do efluente.

Outra fase importante no tratamento preliminar é a estabilização das oscilações na vazão e na composição do efluente, que podem mudar ao longo do tempo em decorrência de processos industriais intermitentes ou variações na produção. Nesse cenário, os tanques de equalização são essenciais, pois asseguram a uniformização de características como pH, temperatura, turbidez, cor, DBO e DQO, oferecendo um efluente mais consistente para as próximas etapas do tratamento (Leme, 2010).

Nunes (2012) destaca também algumas particularidades relevantes desses tanques de equalização. Para sistemas em que a agitação é feita por aeradores de superfície, recomenda-se uma seção transversal quadrada, que facilita a circulação e a mistura eficiente do efluente, com uma profundidade útil de 3 a 5 metros, o que é adequado para garantir um tempo de residência adequado e prevenir a sedimentação prematura. Ademais, a configuração deve possibilitar um acesso facilitado para manutenção e inspeção, assegurando a operação constante e confiável do sistema.

A integração harmoniosa desses processos preliminares - desarenação, separação de óleos e gorduras e equalização - é essencial para proteger equipamentos, otimizar o tratamento posterior e reduzir impactos ambientais, sendo uma prática consolidada em indústrias que geram efluentes complexos e com alta carga de sólidos e compostos orgânicos.

3.2.2 Tratamento Primário dos Efluentes Industriais

Após a realização do tratamento preliminar, inicia-se o tratamento primário nas ETEs. Essa fase tem como objetivo principal a remoção de sólidos decantáveis ou flotáveis que permanecem em suspensão no efluente após o pré-tratamento, reduzindo, assim, a carga de sólidos e de matéria orgânica que será submetida às etapas secundárias e terciárias. Essa redução inicial influencia a eficiência global do sistema, pois efluentes com elevada concentração de sólidos podem comprometer processos biológicos, aumentar a demanda química e gerar dificuldades operacionais em equipamentos de separação mais delicados (Jordão; Pessoa, 2017; Metcalf; Eddy, 2016).

O mecanismo de separação física depende de propriedades como tamanho das

partículas, peso específico e viscosidade. Assim, a sedimentação permite que sólidos mais pesados se depositem no fundo do tanque, enquanto a flotação, frequentemente induzida por ar dissolvido, faz com que partículas menos densas, como gorduras e óleos, sejam removidas na superfície. Tais processos, embora simples, representam significativa redução da carga orgânica bruta (Sanágua, 2014).

O tratamento primário engloba dois enfoques complementares, processos físicos e processos químicos. Os processos físicos envolvem decantação, sedimentação e flotação, buscando a remoção de partículas maiores ou de densidade suficiente para se separar da fase líquida sob ação gravitacional ou por forças de flotação. Equipamentos como decantadores primários e tanques de FAD são amplamente utilizados nesse contexto, garantindo que sólidos sedimentáveis sejam depositados no fundo do tanque e que óleos, graxas e partículas menos densos formem uma camada superficial facilmente removível (Spellman, 2003). A eficiência desses processos depende diretamente do tempo de detenção hidráulica, da geometria dos tanques, da granulometria dos sólidos e da homogeneidade do fluxo do efluente.

Os processos químicos, por sua vez, atuam sobre sólidos coloidais, matéria orgânica dissolvida e substâncias que não podem ser separadas apenas por ação física. Entre as técnicas químicas mais empregadas, estão a coagulação e floculação, que promovem a aglomeração de partículas finas em flocos maiores, facilitando sua sedimentação ou flotação. Além disso, tratamentos químicos podem ser aplicados para controle de odor, remoção de turbidez, neutralização de substâncias ácidas ou alcalinas e até para a retirada de metais pesados e óleos dispersos, ampliando a abrangência do tratamento primário e protegendo os processos posteriores (Jordão; Pessoa, 2017). A escolha dos reagentes, suas dosagens e o ponto de aplicação devem ser cuidadosamente ajustados, considerando a composição química do efluente e a eficiência desejada na remoção de sólidos e contaminantes.

É importante destacar que os equipamentos de flotação e decantação, mencionados por Spellman (2003), embora sejam típicos do tratamento primário, possuem grande versatilidade e podem ser aplicados em estágios secundários e terciários de tratamento, dependendo do objetivo e das características do efluente. No tratamento secundário, por exemplo, decantadores auxiliam na separação de biomassa microbiana após processos biológicos aeróbios ou anaeróbios, enquanto, na etapa terciária, podem ser utilizados para polimento final, retirando sólidos remanescentes e partículas em suspensão muito finas. Essa flexibilidade operacional evidencia a importância do correto dimensionamento e integração dos processos físicos e químicos desde o tratamento primário, garantindo não apenas eficiência na remoção de contaminantes, mas também a proteção e otimização de todo o sistema de tratamento.

O tratamento primário, portanto, cumpre a função estratégica de preparar o efluente para as fases seguintes, reduzindo a carga de SST e de DBO. Ainda que essa etapa não elimine a fração solúvel da matéria orgânica, ela pode representar uma redução de até 30% da DBO, contribuindo para a eficiência global do sistema (Chernicharo, 2007). Assim, o primário é visto como uma fase essencial para ETEs de aviários, uma vez que seu desempenho impacta diretamente o dimensionamento e funcionamento das unidades secundárias. A negligência nesse estágio pode resultar em sobrecarga dos processos biológicos, encarecendo a operação e comprometendo a qualidade do tratamento final.

A remoção de coloides suspensos no efluente é realizada mediante o agregamento dessas partículas com as técnicas de coagulação e floculação. Além de reduzir a turbidez, esses processos também removem o material orgânico, influenciando a DBO e a DQO (Nunes, 2012). A coagulação e a floculação constituem etapas fundamentais no tratamento primário de efluentes, sendo responsáveis pela remoção de coloides suspensos que, devido ao seu tamanho microscópico (0,001 a 1 μm), permanecem em suspensão e não são removidos por sedimentação simples (Crittenden *et al.*, 2015).

Durante a coagulação, as forças repulsivas entre partículas coloidais são enfraquecidas, promovendo a desestabilização e favorecendo colisões que resultam na formação de flocos maiores durante a floculação (Metcalf e Eddy, 2016). Dessa forma, esses flocos maiores podem ser separados nas etapas de filtração, flotação e sedimentação (Metcalf e Eddy, 2016). Os flocos sedimentam a uma determinada velocidade, que pode ser promovida com agitação suave sem quebrá-los (Nunes, 2012). A eficiência dessas etapas depende da natureza do efluente, do tipo e da dosagem dos reagentes empregados, bem como da intensidade de agitação, que deve ser suficientemente suave para permitir a agregação sem fragmentar os flocos (Nunes, 2012).

Na coagulação, fase química dessa sequência, os reagentes empregados são classificados em reagentes coagulantes, que formam hidróxidos insolúveis e gelatinosos que conseguem aglomerar as impurezas; reagentes alcalinizantes, que agregam o caráter básico (pH superior a 7) requerido para a coagulação; e reagentes coadjuvantes, que resultam em partículas mais densas, aumentando o tamanho dos flocos (Crittenden *et al.*, 2015).

Os coagulantes inorgânicos, como sulfato de alumínio, sulfato ferroso e cloreto férrico, são amplamente utilizados devido à sua eficácia em gerar hidróxidos insolúveis que promovem o aglomeramento das partículas (Renault *et al.*, 2009). Entretanto, esses sais metálicos produzem volumes significativos de lodo não biodegradável, o que representa um desafio ambiental e operacional, especialmente em termos de descarte e reciclagem (Nogueira *et al.*, 2010).

Os coagulantes orgânicos de origem natural, como taninos provenientes da acácia negra, têm ganhado destaque em contraponto aos inorgânicos. Esses polímeros naturais de baixa massa molecular atóxicos permitem que o lodo produzido seja tratado biologicamente ou descartado com menor impacto ambiental. Nas ETEs, aplicam-se, principalmente, os coagulantes orgânicos à base de tanino (Piantá, 2008).

Por outro lado, os polieletrólitos, utilizados como coagulantes primários ou coadjuvantes, são polímeros de alta massa molecular que contribuem para a formação de flocos maiores e mais densos (Borba, 2011). A sua ação depende da densidade de carga elétrica. Polieletrólitos catiônicos podem funcionar como coagulantes primários, neutralizando as cargas negativas das partículas suspensas. Os aniônicos auxiliam no crescimento e fortalecimento dos flocos formados pelos coagulantes metálicos, enquanto os neutros aumentam a resistência mecânica dos flocos, o que permite uma sedimentação ou flotação mais eficiente (Martins, 2014). A dosagem correta desses polímeros é fundamental, uma vez que até mesmo pequenas variações podem afetar a eficácia do tratamento e a qualidade do lodo produzido.

Esses polímeros têm menor sensibilidade a mudanças de pH, proporcionando maior flexibilidade operacional em efluentes com propriedades químicas instáveis (Shammas *et al.*, 2010). A monitoração do pH continua sendo fundamental para maximizar a eficiência da coagulação e reduzir o desperdício de reagentes quando se utilizam coagulantes inorgânicos.

Os coagulantes coadjuvantes são majoritariamente polieletrólitos, compostos por cadeias orgânicas longas e de alta massa molecular (Borba, 2011). Embora os custos desses polímeros sejam superiores aos dos compostos de sulfato, isso é compensado pela dosagem relativamente baixa necessária desses compostos no tratamento (Lima, 2007). Os polieletrólitos podem ser neutros (não iônicos), de carga negativa (aniônicos) ou de carga positiva (catiônicos) (Martins, 2014). Os neutros são usualmente empregados com coagulantes metálicos para aumentar o tamanho e a resistência dos flocos, mediante a formação de ligações entre os coloides, e os catiônicos são usualmente empregados como coagulantes primários (Borba, 2011).

Porém, quando o polieletrólito age isoladamente como coagulante, o controle do pH torna-se menos complexo. Quando se combinam polieletrólitos (que auxiliam na floculação) com sais inorgânicos (que atuam como coagulantes), é necessário monitorar o pH (Shammas *et al.*, 2010). O desenvolvimento e a escolha de coagulantes e floculantes, sejam eles inorgânicos ou orgânicos, sintéticos ou naturais, deve-se levar em conta não só a eficácia na eliminação de sólidos e matéria orgânica, mas também a sustentabilidade ambiental e a viabilidade econômica do procedimento.

Pesquisas como a de Ariano (2009) e Manago *et al.* (2018) mostram que a combinação de coagulantes metálicos, como policloretos de alumínio e cloreto férrico, com polímeros catiônicos melhora a formação de flocos, diminui a geração de lodo e aumenta a eficiência no tratamento de efluentes industriais complexos. Essa combinação de tecnologias químicas destaca a relevância de uma estratégia sistemática e adaptativa que leve em conta não apenas os aspectos operacionais, mas também os efeitos ambientais e a sustentabilidade do processo.

O processo de flotação também constitui uma etapa fundamental no tratamento de efluentes, especialmente para a remoção de partículas de baixa densidade, óleos, graxas e sólidos floculados. O princípio básico consiste na inserção de microbolhas de ar na fase líquida, que, ao migrarem para a superfície, geram força de empuxo suficiente para transportar partículas suspensas, promovendo sua concentração em uma camada superficial facilmente removível (Leme, 2010). Esse processo complementa as etapas de coagulação e floculação, garantindo a retirada de partículas que, devido à sua baixa densidade ou pequenas dimensões, não seriam efetivamente sedimentadas em decantadores convencionais.

Existem vários métodos para realizar o processo de flotação: flotação por ar dissolvido (FAD), flotação por ar induzido (FAI), flotação mecânica e eletroflotação (Metcalf e Eddy, 2016). O FAD é notável por sua eficácia e adaptabilidade. Nesse método, o ar é incorporado à fase líquida sob condições de pressão controladas. Quando liberado à pressão atmosférica, ele cria microbolhas que ajudam a transportar as partículas até a superfície (Nunes, 2012). Há duas modalidades de FAD: a primeira é a FAD a vácuo, na qual a fase líquida é saturada com ar à pressão atmosférica e, em seguida, submetida a vácuo; a segunda é a FAD a pressão, na qual se aplica uma faixa de 3,4 a 4,8 atm para dissolver o ar, liberando-o em pressão atmosférica para formar bolhas de 40 a 70 micrômetros (Eckenfelder, 2000; Nunes, 2012).

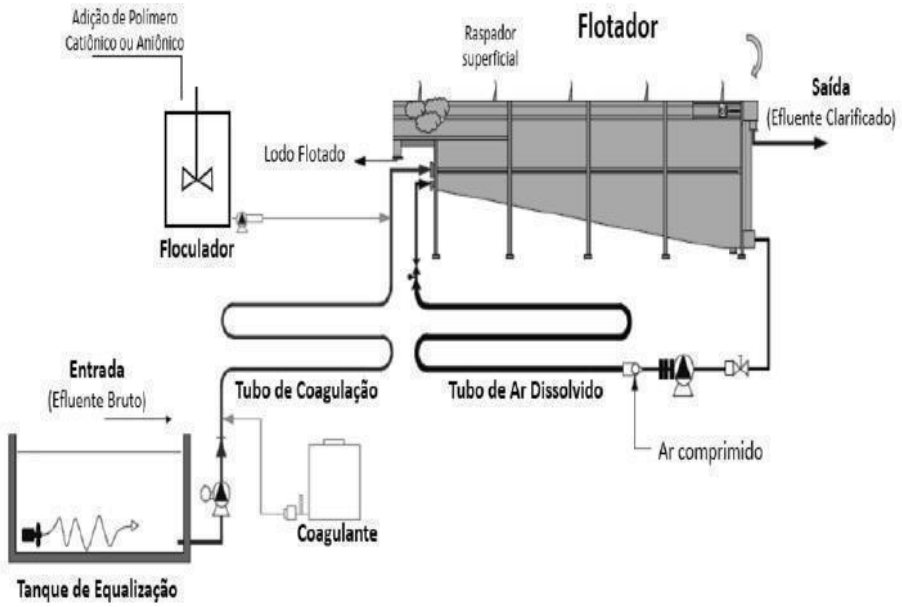
A eficácia do processo depende do tamanho das microbolhas. Estudos sugerem faixas de 30 a 100 micrômetros, com Eckenfelder (2000) propondo 40 a 70 micrômetros, e Rubio *et al.* (2001) indicando cerca de 50 micrômetros como ideais para sistemas industriais. A aderência das partículas às bolhas é afetada não apenas pelo tamanho, mas também pela hidrofobicidade das partículas e pela aplicação anterior de produtos químicos nos processos de coagulação e floculação. O tempo de permanência no tanque de flotação também é crucial; períodos de 10 a 30 minutos possibilitam a formação de agregados estáveis e sua ascensão à superfície (Nunes, 2012).

A flotação modular, utilizada em ETEs de médio e grande porte, oferece vantagens, como facilidade de operação, manutenção simplificada e flexibilidade para diferentes vazões e composições de efluentes. Equipamentos modulares permitem ajustes na taxa de saturação do

ar, velocidade do fluxo, profundidade do tanque e taxa de remoção de lodo, tornando o processo adaptável às variações do efluente industrial (Schatzmann, 2009).

A integração da flotação com processos físicos e químicos anteriores e posteriores é essencial para otimizar o tratamento global do efluente. A coagulação e floculação prévias aumentam a eficiência do transporte das partículas pelas microbolhas, enquanto a flotação, ao remover sólidos finos e graxas, reduz a DBO, DQO e turbidez do efluente, favorecendo a operação de processos secundários e terciários. Essa sinergia entre etapas permite não apenas a melhoria da qualidade do efluente tratado, mas também a redução de impactos ambientais e a viabilização de estratégias de reúso de água industrial, tornando a flotação uma técnica indispensável no contexto de gestão sustentável de recursos hídricos (Matiolo e Rubio, 2003; Metcalf e Eddy, 2016). Os sistemas modulares de flotação para tratamento de efluentes possuem algumas características em sua estrutura e funcionamento que serão mais bem detalhadas a seguir. A Figura 1 apresenta o esquema de um equipamento de flotação por ar dissolvido (Schatzmann, 2009):

Figura 1 - Sistema de tratamento de flotação por ar dissolvido



Fonte: Schatzmann (2009)

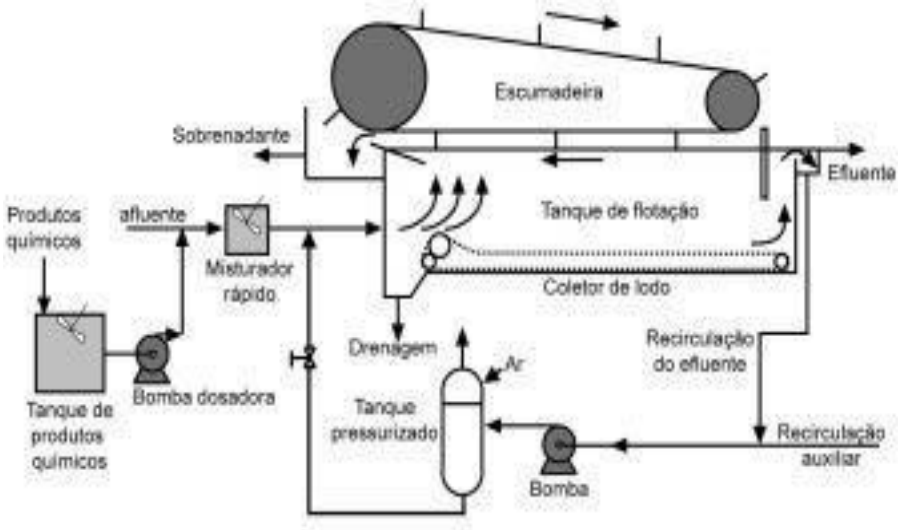
Após o tratamento químico realizado nas etapas de coagulação e floculação, o efluente é direcionado para o flotador, geralmente precedido por um tanque de equalização. Este tanque desempenha um papel fundamental ao garantir a homogeneização das propriedades físico-químicas do efluente, controlar oscilações de vazão e permitir que parte do efluente seja

recirculada para a bomba de microbolhas, essencial para a geração das bolhas de ar que promovem a flotação (Metcalf e Eddy, 2016).

No FAI, o contato entre o ar e o efluente ocorre de forma mais turbulenta, seja por injeção direta de ar ou agitação mecânica intensa, resultando em bolhas de tamanho relativamente grande, em torno de 1.000 μm, adequadas para operações de beneficiamento de minérios, mas menos eficientes para remoção de partículas finas e graxas em efluentes industriais (Dezotti, 2008; Fagundes, 2010). Já no FAD, cria bolhas muito menores, geralmente entre 40 e 70 μm, geradas pela supersaturação do líquido com ar, seja por vácuo ou pressão. Essas microbolhas possuem elevada relação superfície/volume, aumentando a probabilidade de aderência a partículas finas, óleos emulsionados e graxas, resultando em remoção mais eficiente de sólidos leves e contaminantes orgânicos (Dezotti, 2008; Nunes, 2012).

Além da versatilidade operacional, o FAD apresenta vantagens ambientais e econômicas. O tamanho reduzido das bolhas e a capacidade de pressurização permitem trabalhar com menor consumo de coagulantes e floculantes, reduzindo o volume de lodo gerado e os custos associados ao seu tratamento e disposição final (Benetti, 1987; Sobrinho, 2001). O FAD contribui ainda para a melhoria da qualidade da água tratada, garantindo redução de turbidez, DBO e DQO, facilitando o cumprimento de normas ambientais e possibilitando o reúso industrial (APHA, 2017; Silva *et al.*, 2018; Souza *et al.*, 2019).

Figura 2 - Flotação por ar dissolvido (FAD)



Fonte: Metcalf & Eddy (1991)

O diagrama simplificado do FAD apresentado segue os componentes: (i) entrada do efluente; (ii) adição de coagulantes e floculantes; (iii) injeção de ar; (iv) formação de flocos

flutuantes; e (v) saída do efluente clarificado.

Em resumo, o FAD é um processo físico-químico, de separação sólido-líquido, que combina coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido para remover partículas suspensas do efluente e gerar um líquido clarificado. Entretanto, a eficácia do processo ainda depende de fatores como pH, temperatura, concentração e tipo de poluente, exigindo monitoramento constante para otimizar a operação (Oliveira, 2020).

3.2.3 Tratamento Secundário dos Efluentes Industriais

O tratamento secundário constitui a etapa central do processo de depuração dos efluentes avícolas, sendo responsável pela remoção da maior parte da matéria orgânica solúvel e em suspensão não eliminada no tratamento primário. Essa fase se baseia predominantemente em processos biológicos, nos quais comunidades de microrganismos desempenham o papel de degradar compostos orgânicos complexos em substâncias mais simples e menos poluentes (Kunz; Oliveira; Dallago, 2005).

De acordo com Chernicharo (2007), os principais sistemas utilizados nessa etapa são os lodos ativados, as lagoas aeradas e os reatores anaeróbios. Cada um apresenta características próprias que determinam sua aplicabilidade em função das condições operacionais, do espaço disponível e dos custos de implantação. Nos sistemas de lodos ativados, microrganismos aeróbios metabolizam a matéria orgânica em presença de oxigênio, promovendo elevada eficiência na redução da DBO. Já nos reatores anaeróbios, a decomposição ocorre na ausência de oxigênio, com a produção de biogás como subproduto.

Um dos principais atrativos dos processos biológicos é sua alta eficiência na remoção da carga orgânica. Em condições adequadas, é possível alcançar reduções superiores a 90% da DBO, bem como de parâmetros como a DQO (Ribeiro *et al.*, 2019). Esses sistemas são sensíveis a variações na carga orgânica, pH e temperatura, o que exige monitoramento constante para assegurar estabilidade, pois pequenos desvios podem comprometer a atividade microbiológica, resultando em perda de eficiência.

Nos efluentes avícolas, o tratamento secundário também exerce papel relevante na remoção de nutrientes como N e P. Esses elementos, quando presentes em excesso, favorecem o processo de eutrofização em corpos hídricos receptores, promovendo o crescimento descontrolado de algas e a redução do oxigênio dissolvido. A presença de detergentes e desinfetantes, comumente utilizados na higienização de equipamentos e instalações, também pode afetar adversamente a atividade microbiana, exigindo ajustes no processo ou pré-

tratamentos específicos (Carmo; Silva, 2020).

Cavalcanti (2012) destaca que o tratamento secundário utiliza mecanismos como a nitrificação e a desnitrificação para reduzir o N. Na nitrificação, bactérias específicas oxidam o nitrogênio amoniacal, transformando-o em nitrito e nitrato. Já na desnitrificação, ocorre a conversão do nitrato em nitrogênio gasoso, reduzindo o potencial de poluição por nutrientes. Em determinadas condições, essa mesma etapa pode contribuir para a remoção de P e de compostos orgânicos persistentes.

Na indústria de abate e processamento de aves, os sistemas mais adotados são as lagoas de estabilização, os reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB) e os sistemas de lodo ativado (Del Nery, 2007). As lagoas de estabilização apresentam baixo custo de implantação e operação, embora exijam grandes áreas, o que nem sempre é viável em regiões de alta densidade industrial. Já os reatores anaeróbios são valorizados pelo baixo consumo energético, visto que dispensam a aeração, além de produzirem menor volume de lodo quando comparados a sistemas aeróbios (Nunes, 2014).

Entre as alternativas tecnológicas, destaca-se a combinação de processos, como o uso FAD no tratamento primário, seguida de um reator anaeróbio UASB no tratamento secundário. Essa configuração tem demonstrado elevada eficiência, alcançando remoções superiores a 90% da matéria orgânica presente nos efluentes avícolas (Del Nery, 2007). Essa integração de processos garante maior robustez ao sistema, permitindo lidar com a variabilidade da carga poluidora característica desse tipo de resíduo.

Ainda que eficazes, os processos secundários apresentam desafios relacionados ao manejo do lodo gerado, ao controle da atividade microbiológica e à necessidade de infraestrutura de monitoramento. Em muitos casos, torna-se fundamental associar essa etapa a processos terciários ou de polimento, especialmente quando há intenção de reutilizar a água tratada ou de atender a legislações ambientais mais restritivas. A eficiência do tratamento secundário, portanto, está diretamente ligada à adequação tecnológica e à correta operação das unidades envolvidas.

3.2.4 Lagoas de Estabilização

As lagoas de estabilização são fundamentais para o tratamento em países tropicais devido à simplicidade e ao uso de energia solar (Von Sperling, 2017).

- Lagoas Anaeróbias: focam na decomposição inicial com eficiências de DBO entre 50% e 70% (Jordão e Pessoa, 2017; Nunes, 2014).

- Lagoas Aeradas: oxidam a matéria orgânica residual e promovem a nitrificação (Von Sperling, 2017; Jordão e Pessoa, 2017).
- Lagoas de Maturação: etapa final para polimento microbiológico, com eficiências de até 95% (Von Sperling, 2017; Lora, 2001; Mendonça, 1990).

A Tabela 1 compila os critérios de projeto recomendados pela literatura, fornecendo parâmetros essenciais para o dimensionamento e otimização desses sistemas.

Tabela 1 - Parâmetros para o dimensionamento de lagoas anaeróbias

Parâmetro	Faixa de valores	Referência
Tempo de detenção (dias)	3 a 6	Von Sperling (2017)
	2 a 5	Jordão e Pessoa (2017)
Taxa de aplicação (kg DBO5 / (m3. d)	0,1 a 0,35	Von Sperling (2017)
	0,1 a 0,3	Nunes (2014)
Profundidade (m)	3 a 5	Von Sperling (2017); Nunes (2014)
	3 a 4,5	Jordão e Pessoa (2017)
	2,4 a 5,2	Eckenfelder (2000)
Razão entre comprimento e largura L/B (m/m)	1 a 3	Von Sperling (2017)
	2 a 3	Jordão e Pessoa (2017)
Remoção de lodo (anos)	Em torno de 10	Jordão e Pessoa (2017)
Eficiência de remoção de DBO (%)	75 a 85	Von Sperling (2017)
	65 a 80	Jordão e Pessoa (2017)
	59	Eckenfelder (2000)
	70 a 90	Nunes (2014)

Fonte: Adaptado de Von Sperling, (2017); Nunes, (2014); Cavalcanti, (2012); Jordão; Pessoa, (2017).

O tempo de detenção hidráulica varia de 2 a 6 dias, dependendo das condições climáticas, do tipo de efluente e da eficiência necessária para a remoção da DBO. Esse intervalo mostra que o dimensionamento precisa ser ajustado às particularidades de cada setor, assegurando tempo adequado para a decomposição da matéria orgânica.

As lagoas aeradas representam, em sua maior parte, um processo aeróbio no qual o oxigênio dissolvido é fornecido por meio de aeradores mecânicos. Segundo Von Sperling

(2017), esses aeradores, além de fornecer oxigênio, são responsáveis por manter os sólidos separados da fase líquida devido aos seus mecanismos mecânicos. Assim, os microrganismos conseguem degradar o material orgânico de forma mais eficiente.

A taxa de aplicação de DBO também apresenta variação, indicando que o sistema deve ser calibrado para evitar sobrecarga orgânica, o que poderia comprometer a eficiência anaeróbia. A profundidade das lagoas pode variar de 2,4 a 5 m, o que é determinante para evitar a absorção de oxigênio e garantir condições favoráveis para a atividade microbiana (Cavalcanti, 2012).

A eficiência real de remoção de DBO pode variar de 59 a 90%, o que evidencia que o desempenho das lagoas anaeróbias depende de múltiplos fatores, incluindo características do efluente, temperatura, insolação e correta operação do sistema (Von Sperling, 2017; Nunes, 2014; Jordão & Pessoa, 2017; Eckenfelder, 2000). Dessa forma, a análise combinada desses parâmetros permite um dimensionamento mais seguro e eficaz, assegurando que as lagoas anaeróbias cumpram sua função como etapa estratégica do tratamento secundário de efluentes aviários.

Outro ponto relevante é a razão entre comprimento e largura (L/B), que deve ser cuidadosamente definida para otimizar a hidráulica interna, reduzindo zonas de curto-circuito e garantindo uma distribuição uniforme do fluxo. O dimensionamento de lagoas aeradas é de extrema importância e segue parâmetros preestabelecidos, conforme exposto na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 - Parâmetros para o dimensionamento de lagoas aeradas

Parâmetro	Faixa de valores	Referência
Tempo de detenção (dias)	2 a 4	Von Sperling (2017)
	2 a 10	Jordão e Pessoa (2017)
		Eckenfelder (2000)
Profundidade (m)	2,5 a 4	Von Sperling (2017)
	3 a 4	Jordão e Pessoa (2017)
	2,4 a 4,9	Eckenfelder (2000)
Razão entre comprimento e largura L/B (m/m)	1 a 2	Von Sperling (2017)
Eficiência de remoção de DBO (%)	75 a 85	Von Sperling (2017)
	90 a 95	Jordão e Pessoa (2017)
	80	Eckenfelder (2000)

Parâmetro	Faixa de valores	Referência
	70 a 90	Nunes (2014)

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2017); Nunes (2014); Cavalcanti (2012); Jordão; Pessoa (2017); Eckenfelder (2000).

A variação do tempo de detenção hidráulica reflete nas diferenças no tipo de efluente, na carga orgânica e nas condições climáticas. Este parâmetro determina o tempo que o efluente permanecerá na lagoa, permitindo que processos biológicos e físicos ocorram de maneira eficiente e evitando sobrecarga do sistema (Von Sperling, 2017; Jordão; Pessoa, 2017).

As lagoas que empregam bactérias e algas sujeitas à fotossíntese são conhecidas como facultativas. Nestes sistemas, uma porção do material orgânico é convertida em material inorgânico estabilizado, que é levado com o efluente. A outra parte da matéria orgânica é estabilizada como células de algas (Mendonça, 1990). Essas lagoas retêm o efluente por um tempo longo o suficiente para viabilizar a estabilização do material orgânico mediante as bactérias presentes na fase líquida (Cavalcanti, 2012). A Tabela 3 compila critérios de projeto obtidos da literatura para o dimensionamento de lagoas facultativas:

Tabela 3 - Parâmetros para o dimensionamento de lagoas facultativas

Parâmetro	Faixa de valores	Referência
Tempo de detenção (dias)	15 a 45	Von Sperling (2017) Jordão; Pessoa (2017); Eckenfelder (2000)
	30 a 180	Lora (2001)
Profundidade (m)	1,5 a 2	Von Sperling (2017)
	1 a 3	Jordão e Pessoa (2017)
	0,9 a 2,4	Lora (2001)
	0,9 a 1,8	Eckenfelder (2000)
	1 a 2	Nunes (2014)
Razão entre comprimento e largura L/B (m/m)	2 a 4	Von Sperling (2017)
Remoção de lodo (anos)	Mais de 20 anos	Von Sperling (2017)
		Eckenfelder (2000)
Eficiência de remoção de DBO (%)	75 a 85	Von Sperling (2017); Nunes (2014)
	75 a 95	Lora (2001)
	70 a 90	Mendonça (1990)

Fonte: Adaptado de Von Sperling, (2017); Nunes, (2014); Cavalcanti, (2012); Jordão; Pessoa, (2017); Eckenfelder, (2000); Lora, (2001); Mendonça, (1990).

As lagoas de maturação representam a etapa final do tratamento secundário de efluentes, complementando os processos que removem a matéria orgânica e garantindo a segurança sanitária do efluente tratado. O tempo de detenção hidráulica dessas lagoas é significativamente maior do que nas lagoas anaeróbias ou facultativas, variando de 15 a 180 dias, dependendo das condições de projeto e das exigências de eficiência microbiológica (Von Sperling, 2017; Lora, 2001). Esse tempo prolongado é necessário para permitir a redução de coliformes e outros microrganismos patogênicos, além de estabilizar o efluente antes de seu lançamento ou reúso (Tabela 3).

A profundidade das lagoas de maturação é relativamente menor, entre 0,9 e 3 m, favorecendo a penetração da luz solar e a oxigenação natural, fatores essenciais para a inativação de patógenos e para a manutenção de condições aeróbias na coluna dágua (Nunes, 2014; Mendonça, 1990). A razão comprimento/largura (L/B) recomendada entre 2 e 4 é determinante para otimizar a hidráulica interna, evitando zonas de curto-circuito e garantindo que todo o volume do efluente participe efetivamente do processo de maturação (Von Sperling, 2017).

A eficiência de remoção de DBO nas lagoas de maturação varia entre 70 e 95%, demonstrando que, quando corretamente dimensionadas e operadas, essas lagoas complementam o tratamento das etapas anteriores, eliminando nutrientes remanescentes e contribuindo para a conformidade com padrões sanitários e ambientais (Von Sperling, 2017; Lora, 2001; Mendonça, 1990). Além disso, a maturação promove a redução de agentes patogênicos por meio da combinação de radiação solar, oxigenação e ajuste do pH, assegurando que o efluente final esteja apto para lançamento ou reúso seguro (Mendonça, 1990; Nunes, 2014). Na Tabela 4, estão compilados critérios de projeto obtidos da literatura para o dimensionamento de lagoas de maturação.

Tabela 4 - Parâmetros para o dimensionamento de lagoas de maturação

Parâmetro	Faixa de valores	Referência
Tempo de detenção (dias)	12	Von Sperling (2017)
	3 a 7	Jordão e Pessoa (2017)
	5 a 7	Mendonça (1990); Nunes (2014)
Profundidade (m)	0,8 a 1,2	Von Sperling (2017)
	1 a 1,5	Nunes (2014)

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2017); Nunes (2014); Jordão; Pessoa (2017); Eckenfelder (2000); Mendonça (1990).

O tempo de retenção, que varia de 3 a 12 dias, dependendo da referência, garante que o efluente permaneça na lagoa o tempo necessário para que os processos biológicos e físicos estabilizem o material orgânico e eliminem coliformes (Mendonça, 1990; Von Sperling, 2017). A radiação solar e a oxigenação natural, que são fatores importantes para a maturação eficaz do efluente, podem penetrar mais facilmente devido à profundidade reduzida, que varia de 0,8 a 1,5 m (Nunes, 2014).

Estudos como os de Arruda (2004) e Brito e Bastos (2019) apontam que o frigorífico avícola produz efluentes com elevada carga de matéria orgânica e nutrientes, o que exige o uso de técnicas combinadas de tratamento. As lagoas anaeróbicas são eficazes na decomposição da matéria orgânica em condições de ausência de oxigênio, permitindo a digestão de compostos complexos em moléculas simples, como metano e dióxido de carbono. No entanto, este processo pode gerar subprodutos, como sulfetos, que necessitam de tratamento adicional antes do descarte final (Brito; Bastos, 2019).

As lagoas anaeróbicas são eficazes na decomposição da matéria orgânica por meio de processos biológicos que ocorrem na ausência de oxigênio, embora possam resultar na

formação de subprodutos como metano e sulfetos. Por outro lado, Ferreira *et al.* (2024) destacam que as lagoas aeróbicas complementam esse processo ao utilizarem oxigênio para oxidar a matéria orgânica residual, porém ainda podem gerar resíduos que requerem tratamento adicional (Brito; Bastos, 2019).

Além das lagoas de estabilização, tecnologias emergentes têm sido investigadas para complementar o tratamento de efluentes de aviários. A utilização de microalgas, como *Parachlorella kessleri*, apresenta potencial na remoção de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, presentes nos efluentes, além de possibilitar a produção de biomassa utilizável como biofertilizante (Achag *et al.*, 2023; Dornelas, 2021). Essa abordagem não apenas melhora a qualidade do efluente tratado, mas também promove a sustentabilidade do processo, integrando tratamento e reaproveitamento de recursos.

O uso de nanobolhas de ozônio tem se mostrado promissor, pois demonstram eficácia na desinfecção e na melhoria da biodegradabilidade do efluente, aumentando a taxa de remoção de poluentes e reduzindo a formação de subprodutos tóxicos (Karchiyappan *et al.*, 2025; Atchala *et al.*, 2025). A implementação dessas tecnologias, contudo, requer investimentos em infraestrutura e monitoramento constante, reforçando a importância do dimensionamento adequado das lagoas de estabilização e do planejamento integrado dos sistemas de tratamento, garantindo eficiência operacional e sustentabilidade ambiental (Tchobanoglous, Burton & Stensel, 2003; Verbyla, von Sperling & Maiga, 2017).

3.2.5 Sistemas de Lodo Ativado (LA)

Os sistemas de lodo ativado (LA) tornam-se uma escolha estratégica quando as especificações de qualidade do efluente tratado são elevadas e o espaço físico disponível é limitado, especialmente em indústrias avícolas com altos volumes de efluentes. Esses sistemas diferem das lagoas de estabilização pela maior complexidade operacional, exigindo equipamentos de aeração mecânica, sistemas de recirculação de lodo e monitoramento contínuo de parâmetros como oxigênio dissolvido e carga orgânica (Van Haandel, 2025; Rodrigues, 2023). Apesar do elevado consumo energético, a principal vantagem do LA é a capacidade de garantir efluentes com padrões de qualidade superior, atendendo a normas ambientais rígidas e possibilitando o reúso em processos industriais ou agrícolas.

O funcionamento do sistema baseia-se na interação de três componentes principais: o tanque de aeração, o decantador secundário e o mecanismo de recirculação de lodo (Figura 2). No tanque de aeração, as reações bioquímicas promovidas pelos microrganismos transformam

a matéria orgânica complexa em biomassa floculada, que, posteriormente, sedimenta no decantador secundário. A biomassa decantada é parcialmente recirculada no tanque de aeração, garantindo a manutenção da população microbiana necessária para a estabilização do efluente. Estudos recentes mostram que o controle preciso da idade do lodo e da taxa de recirculação é determinante para maximizar a remoção de DBO e DQO, além de reduzir a formação de subprodutos indesejáveis (Van Haandel, 2025; Rodrigues, 2023).

No contexto do tratamento de efluentes avícolas, o sistema de lodo ativado é particularmente relevante devido à elevada carga orgânica presente nas águas residuais provenientes dessas atividades. A capacidade de recirculação do lodo e a manutenção da biomassa ativa garantem a redução eficaz de DBO e sólidos suspensos, contribuindo para a proteção ambiental e para o cumprimento das regulamentações sanitárias.

Apesar da eficiência elevada, a implementação de sistemas de LA implica custos operacionais significativos, decorrentes do consumo energético, manutenção de equipamentos e monitoramento técnico especializado (Jordão; Pessoa, 2017). Por outro lado, as lagoas de estabilização, com operação mais simples e menores exigências energéticas, continuam sendo a solução predominante em países tropicais e em desenvolvimento, como o Brasil, sobretudo quando há disponibilidade de área e a exigência do efluente final não é tão rigorosa (Verbyla; Von Sperling; Maiga, 2017).

O uso de bioaeradores de alta eficiência tem sido estudado para aumentar a eficiência do LA, que é um sistema que consiste no uso sistemas de aeração por microbolhas e integração com processos de digestão anaeróbia, que possibilitam a recuperação de biogás e a redução da carga orgânica antes da descarga final (Atchala *et al.*, 2025; Karchiyappan *et al.*, 2025). Essas inovações demonstram que, embora o LA seja mais custoso e complexo, ele oferece flexibilidade operacional e adaptabilidade às diferentes cargas de efluentes, tornando-o adequado para indústrias que exigem alto padrão de tratamento e pretendem reduzir impactos ambientais e custos com conformidade regulatória a longo prazo.

O tanque de aeração nos sistemas de lodo ativado funciona como um reator biológico onde microrganismos aeróbicos transformam compostos orgânicos complexos em biomassa floculada, ou seja, dióxido de carbono e água, processo que é intensificado por sistemas de aeração mecânica ou por injeção direta de ar (Metcalf; Eddy, 2016; Van Haandel, 2025). A biomassa formada, conhecida como lodo ativado, sedimenta posteriormente no decantador secundário, permitindo a separação eficiente das fases líquida e sólida. O recirculo do lodo garante a manutenção da população microbiana necessária para sustentar a atividade biológica do sistema, aumentando a eficiência da remoção de DBO e DQO (Rodrigues, 2023).

O controle da idade do lodo constitui um fator importante na operação dos sistemas de LA. Um tempo de detenção prolongado para a fase sólida aumenta a estabilização da matéria orgânica, enquanto o baixo tempo de detenção para a fase líquida permite que o efluente tratado seja rapidamente conduzido para etapas subsequentes ou para lançamento seguro no corpo receptor (Jordão & Pessoa, 2017; Van Haandel, 2025). A remoção periódica do lodo excedente é necessária, sendo imprescindível seu tratamento adequado antes do descarte final, para prevenir impactos ambientais e atender aos padrões de qualidade exigidos por legislações ambientais.

Em comparação, as lagoas de estabilização permanecem como a alternativa predominante para o setor avícola em países tropicais e em desenvolvimento, como o Brasil, devido à menor complexidade operacional, baixos custos e maior tolerância a variações na carga de efluente (Verbyla, von Sperling & Maiga, 2017). A escolha entre sistemas de lodo ativado e lagoas de estabilização deve considerar uma análise integrada, envolvendo eficiência de remoção, custos de operação, disponibilidade de área e objetivos de sustentabilidade ambiental, garantindo que a solução adotada seja eficaz tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

No entanto, a escolha entre lagoas de estabilização e sistemas de lodo ativado depende de fatores como eficiência, espaço disponível, custo operacional e requisitos de qualidade do efluente final. Enquanto as lagoas são mais econômicas, de fácil operação e adequadas para países tropicais, o LA oferece maior controle sobre a qualidade do efluente e permite adaptação a variações de carga (Verbyla, von Sperling & Maiga, 2017; Van Haandel, 2025). Estratégias integradas, combinando lagoas anaeróbias, aeradas e LA, podem otimizar o tratamento, reduzindo impactos ambientais e aumentando a sustentabilidade do processo industrial.

3.2.6 Tratamento Terciário

O tratamento terciário é considerado a etapa mais avançada no processo de depuração de efluentes, sendo aplicado quando se busca atender a padrões ambientais mais rigorosos ou possibilitar o reúso da água tratada. No caso dos efluentes provenientes de aviários, essa fase adquire importância pela elevada carga de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, e pela presença de microrganismos patogênicos que podem representar riscos à saúde humana e animal (Chernicharo, 2007).

Segundo Von Sperling (2014), essa etapa compreende processos físicos, químicos e biológicos adicionais, capazes de remover poluentes que resistem aos tratamentos primário e

secundário. Entre as tecnologias aplicáveis, destacam-se a desinfecção por radiação ultravioleta ou cloração, a remoção de nutrientes por processos de nitrificação-desnitrificação e precipitação química, além da utilização de membranas de ultrafiltração ou osmose reversa.

No contexto da avicultura, a presença de detergentes, gorduras e substâncias recalcitrantes torna necessária a utilização de técnicas específicas que possam atuar sobre compostos de difícil degradação. Estudos apontam que o emprego de processos oxidativos avançados, como ozonização e peróxido de hidrogênio, é promissor na redução de compostos persistentes e na eliminação de patógenos (Ribeiro *et al.*, 2019).

A adoção do tratamento terciário ainda é limitada no Brasil, sobretudo em efluentes agroindustriais, devido ao seu elevado custo de implantação e operação. A necessidade de tecnologias sofisticadas e de mão de obra qualificada torna esse processo menos acessível para pequenas e médias empresas do setor avícola que, frequentemente, optam apenas pelos tratamentos primário e secundário (Carmo; Silva, 2020).

Apesar dessas limitações, a implementação do tratamento terciário pode trazer benefícios significativos, como a possibilidade de reutilização da água em processos industriais, irrigação e higienização das instalações. Além disso, reduz o potencial poluidor do setor e reforça a imagem sustentável das empresas perante o mercado consumidor. Nesse sentido, investir em tecnologias avançadas de tratamento torna-se uma estratégia alinhada às demandas atuais por produção responsável e redução de impactos ambientais.

O tratamento terciário de efluentes assume papel fundamental na mitigação de impactos ambientais, pois os resíduos líquidos desse setor apresentam alta concentração de nutrientes, sólidos suspensos e microrganismos patogênicos. Segundo Von Sperling (2014), essa etapa é responsável pelo polimento do efluente, removendo compostos que não foram tratados nas fases anteriores e garantindo maior qualidade da água. Na indústria avícola, esse processo se mostra particularmente relevante, uma vez que o elevado aporte de matéria orgânica, nitrogênio e fósforo pode comprometer seriamente os corpos hídricos receptores.

Entre as tecnologias aplicadas, destacam-se os processos biológicos de remoção de nutrientes, conhecidos como BNR (*Biological Nutrient Removal*). Conforme Jordão e Pessoa (2017), esses sistemas permitem realizar nitrificação, desnitrificação e remoção biológica de fósforo, reduzindo de forma eficiente compostos que, em excesso, favorecem a eutrofização. Para o setor avícola, essa abordagem é estratégica, pois o efluente apresenta resíduos de sangue, vísceras e ração não consumida - fontes importantes de fósforo e nitrogênio. Assim, ao priorizar processos biológicos, as estações de tratamento conseguem associar eficiência técnica e custos mais acessíveis em comparação a métodos exclusivamente físico-químicos.

Os processos oxidativos avançados também representam alternativas viáveis, especialmente em empreendimentos de maior porte que demandam padrões de qualidade mais elevados. De acordo com Ribeiro *et al.* (2019), técnicas como ozonização, peróxido de hidrogênio e radiação UV são eficazes na degradação de compostos orgânicos recalcitrantes, que conferem odor, coloração e toxicidade ao efluente. Apesar de sua maior complexidade operacional e custo, esses métodos podem ser aplicados de forma complementar, ampliando a segurança sanitária e atendendo a exigências ambientais mais rigorosas.

Outro aspecto indispensável do tratamento terciário é a desinfecção, etapa diretamente vinculada à proteção da saúde pública. Conforme Del Nery (2007), tecnologias como cloração, radiação UV e ozonização garantem a eliminação de microrganismos patogênicos que poderiam comprometer atividades agrícolas, de irrigação ou até mesmo o abastecimento humano. No caso de frigoríficos avícolas, esse ponto é crucial, visto que os efluentes possuem elevada carga microbiológica, e sua liberação inadequada pode aumentar o risco de disseminação de doenças.

O tratamento terciário abre espaço para práticas de reutilização da água em atividades menos nobres da própria cadeia produtiva, como lavagem de pisos, irrigação de áreas de apoio e sistemas de resfriamento. De acordo com Carmo e Silva (2020), a reutilização d'água planejada contribui para reduzir a pressão sobre mananciais, o que é particularmente importante em regiões de escassez hídrica ou de elevada concentração de empreendimentos avícolas. Essa possibilidade reforça a dimensão sustentável do tratamento terciário, ampliando sua relevância para além do cumprimento da legislação ambiental.

A implementação de sistemas terciários no tratamento de efluentes de frigoríficos avícolas deve ser entendida como um investimento em sustentabilidade e segurança socioambiental. Embora não exista uma solução única, a integração de diferentes tecnologias, desde BNR até membranas e processos oxidativos, tende a gerar melhores resultados, adaptando-se à escala produtiva e à realidade econômica da região. Nesse sentido, a decisão deve ser pautada por critérios técnicos, econômicos e ambientais, garantindo não apenas a conformidade legal, mas também a preservação dos ecossistemas e a valorização da cadeia produtiva avícola no longo prazo.

A destinação final da água empregada no tratamento de efluentes deve cumprir estritamente a legislação ambiental em vigor, incluindo normas federais, estaduais e municipais. O lançamento pode ser feito de maneira indireta, no solo, ou de forma direta, nos corpos hídricos, desde que as condições legais sejam cumpridas (Von Sperling, 1997). Essa regulamentação tem como objetivo reduzir os impactos ambientais, garantindo a proteção dos recursos hídricos e a preservação da biodiversidade, além de garantir condições adequadas para

o uso da água em diferentes atividades, como abastecimento, recreação e irrigação. Apenas efluentes que atendem aos padrões de qualidade determinados pelo órgão ambiental competente (CONAMA, 2011) podem ser despejados em corpos hídricos.

Em nível federal, a Resolução CONAMA n.º 430/2011 atualizou a Resolução n.º 357/2005, estabelecendo diretrizes para a classificação e enquadramento dos corpos de água, além de condições e padrões para o lançamento de efluentes (Brasil, 2005; 2011). Essa atualização demonstra a necessidade de adotar critérios mais estritos de proteção ambiental, levando em conta os progressos na tecnologia de tratamento de efluentes e a pressão cada vez maior sobre os recursos hídricos.

A Tabela 5 apresenta um resumo dos principais valores estipulados pela Resolução CONAMA n.º 430/2011 para alguns desses parâmetros, destacando limites máximos permitidos e a importância de cada indicador para quantificar a eficiência do tratamento de efluentes. A análise desses valores é fundamental para a avaliação contínua do desempenho dos sistemas de tratamento, permitindo ajustes operacionais e garantindo a conformidade ambiental.

A integração entre processos de tratamento eficientes e a conformidade regulatória garante que o lançamento de efluentes no ambiente ocorra de maneira segura e sustentável, atendendo aos critérios estabelecidos por legislações federais, estaduais e municipais. A Resolução CONAMA n.º 430/2011 fornece um referencial indispensável para orientar o gerenciamento de efluentes industriais, definindo parâmetros quantitativos e qualitativos que asseguram a mitigação dos impactos ambientais. O acompanhamento sistemático desses indicadores permite a operação contínua e eficiente dos sistemas de tratamento, garantindo que a água lançada ao meio ambiente seja compatível com os padrões de qualidade preestabelecidos.

Tabela 5 - Parâmetros exigidos pela Resolução CONAMA n.º 430/2011

Parâmetro do efluente	Faixa de valores ou quantidade exigida
Temperatura	Menor do que 40 °C
pH	Entre 5 e 9
DBO	Mínima redução em 60 %
Concentração de nitrogênio amoniacal	20 mg / L
Concentração de graxas e óleos	No máximo 50 g / L
Material sedimentar	No máximo 1 mL / (h. L)
Material flutuante	Ausente

Fonte: Brasil, (2011)

Segundo Olivo (2006), os principais parâmetros de interesse para o monitoramento de efluentes na indústria de abate e processamento de aves incluem temperatura, pH, DBO, DQO, concentrações de óleos, graxas e nitrogênio amoniacal, além das cargas de materiais orgânicos e sedimentáveis. Esses indicadores são essenciais não apenas para avaliar a eficiência dos processos de tratamento, mas também para garantir que o lançamento do efluente no meio ambiente não comprometa a qualidade da água e do solo, evitando impactos negativos aos ecossistemas e à saúde pública (Olivo, 2006; Metcalf; Eddy, 2016).

O despejo de efluentes no solo, quando planejado e controlado, constitui uma estratégia eficiente de tratamento integrado em que processos biológicos, químicos e físicos naturais contribuem para a estabilização e absorção de nutrientes presentes na água residual. Couracci (2003) destaca que, nesse contexto, o solo atua como um filtro natural, promovendo a decomposição da matéria orgânica, enquanto plantas cultivadas no local absorvem nutrientes essenciais e parte da água, integrando o ciclo de nutrientes e minimizando perdas ambientais. Essa abordagem evidencia a possibilidade de transformar resíduos em recursos, aliando eficiência ambiental à sustentabilidade agrícola.

Von Sperling (1997) ressalta que processos como irrigação, infiltração, percolação e escoamento superficial aumentam a eficiência do tratamento quando o efluente é aplicado ao solo, seja em áreas com ou sem cobertura vegetal. As plantas utilizam água e nutrientes, contribuindo, assim, para a evapotranspiração, reduzindo o excesso de umidade e prevenindo a saturação do solo. Uma parte da água infiltrada é conduzida ao lençol freático, cuja profundidade mínima recomendada é de 60 cm, garantindo que a contaminação das águas subterrâneas seja evitada. Essa prática exige monitoramento rigoroso e planejamento técnico,

considerando o tipo de solo, o clima local e a capacidade de absorção da vegetação (Von Sperling, 1997; Droste, 2018).

Na irrigação, considerada a forma mais utilizada para disposição de efluentes, a água residual é aplicada via aspersão ou diretamente à superfície do solo, controlando-se a taxa de aplicação de acordo com o tipo de cobertura vegetal e o solo disponível. Metcalf e Eddy (2016) indicam que, para gramados, a taxa média é de 150 m^3/(ha/dia), enquanto, para solos agrícolas cultivados, essa taxa varia entre 1/5 e 1/3 desse valor, prevenindo excesso de umidade e lixiviação de nutrientes. Além disso, a aplicação planejada permite a incorporação gradual de nutrientes, contribuindo para o crescimento vegetal sem causar poluição ambiental.

Silva *et al.* (2020) destacam que a utilização de efluentes em solos agrícolas deve ser acompanhada de análises periódicas de metais pesados, patógenos e nutrientes, evitando impactos cumulativos ao longo do tempo. A adoção de práticas integradas, aliando tratamento adequado, aplicação controlada no solo e monitoramento constante, representa uma estratégia eficaz de gestão de efluentes, combinando eficiência operacional e preservação ambiental.

A aplicação de efluentes no solo ou via irrigação, quando realizada de forma planejada, controlada e acompanhada de monitoramento técnico, transforma-se em uma solução sustentável para a disposição final de águas residuais industriais. A integração entre tratamento, avaliação de parâmetros críticos e aproveitamento agrícola demonstra que os efluentes podem ser vistos não apenas como resíduos, mas como recursos a serem reaproveitados, promovendo eficiência econômica, ambiental e social.

4 METODOLOGIA

4.1 Natureza da Pesquisa

O presente estudo adotou uma abordagem mista, integrando uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL) e um estudo de caso em uma unidade industrial de abate de aves, localizada em Minas Gerais. O estudo de caso adotou uma abordagem quantitativa, e o desempenho do sistema de tratamento foi avaliado sob duas perspectivas: a análise longitudinal de desempenho, que contrastou os regimes operacionais pré e pós-implementação da unidade de flotação (FAD) em abril de 2021, e o diagnóstico de eficiência por unidade operacional, que monitorou o perfil de remoção de poluentes ao longo das sucessivas unidades operacionais (AR: águas residuárias, 1LA: primário, 2LA: anaeróbico, 3LA: aeróbico, 4FT: FAD e 5ET: tratado).

4.2 Revisão Sistemática de Literatura

A revisão sistemática de literatura consiste em um método de investigação científica que busca identificar, selecionar, avaliar criticamente e sintetizar estudos já publicados sobre determinado tema ou problema de pesquisa (Kitchenham, 2004). Dessa forma, trata-se de uma ferramenta fundamental para mapear o estado da arte, apontar lacunas do conhecimento e fundamentar teoricamente novas pesquisas.

Para a elaboração desta revisão, foram definidos descritores relacionados ao eixo temático do trabalho, contemplando palavras-chave em português e inglês, como Sistema de Flotação por Ar Dissolvido, efluentes avícolas e estação de tratamento de efluentes. A busca foi realizada em bases de dados científicos de reconhecimento nacional e internacional, como *Scopus, Web of Science, SciELO* e *Google Scholar*. Como critérios de inclusão, foram selecionados artigos publicados entre 2015 e 2025, escritos em português, inglês ou espanhol, que abordassem diretamente a relação entre os sistemas de tratamento de efluentes agrícolas. Foram excluídos trabalhos duplicados, resumos simples de eventos e produções sem acesso ao texto completo.

Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, foram selecionados os estudos para análise. Esses trabalhos foram organizados em categorias temáticas, a fim de possibilitar uma síntese crítica das contribuições existentes. Inicialmente, realizou-se uma análise detalhada de títulos, em seguida, de resumos e, quando necessário, do texto completo, seguindo-se os critérios de elegibilidade definidos nesta metodologia da pesquisa. A revisão evidenciou o

sistema FAD integrado aos processos de tratamento primário e terciário de efluentes em frigoríficos e as características dos efluentes de origem avícola, destacando a relevância da temática tanto no campo teórico quanto prático. Nesse sentido, a revisão sistemática de literatura constitui-se como base para a construção deste estudo, servindo de apoio para a definição dos objetivos e para o direcionamento da análise dos resultados.

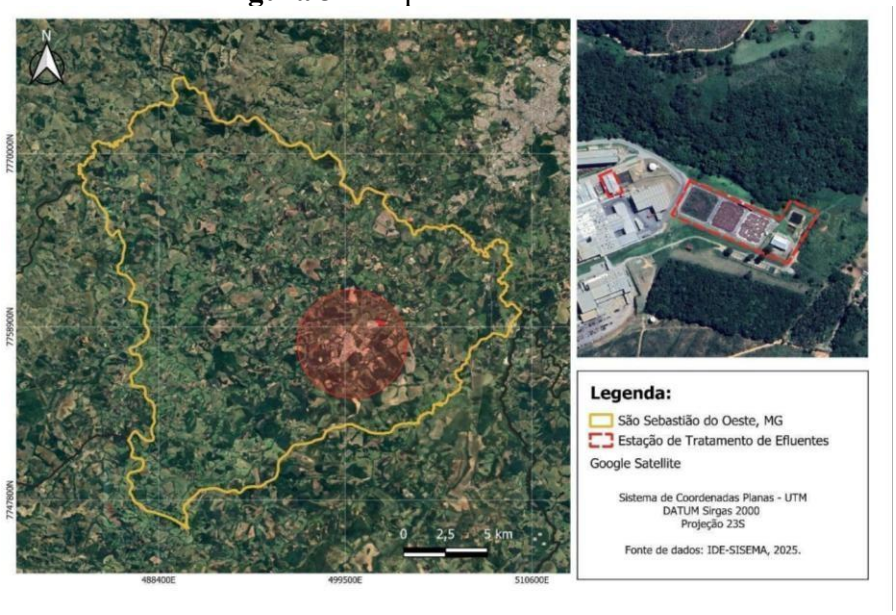
Os filtros adotados foram os seguintes: (i) artigos de revistas científicas avaliadas como superior a C pelo portal Qualis Periódicos; (ii) artigos publicados no período de 2015 a 2025; (iii) acesso livre ou artigos suportados pela Comunidade Acadêmica Federada (CAFe), provida pela Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP), que disponibiliza artigos gratuitamente para as instituições federais brasileiras associadas.

4.3 Estudo de Caso

4.3.1 Descrição Geral da ETE

O estudo de caso foi conduzido em uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) localizada em São Sebastião do Oeste, MG (Figura 3).

Figura 3 - Mapa da área de estudo

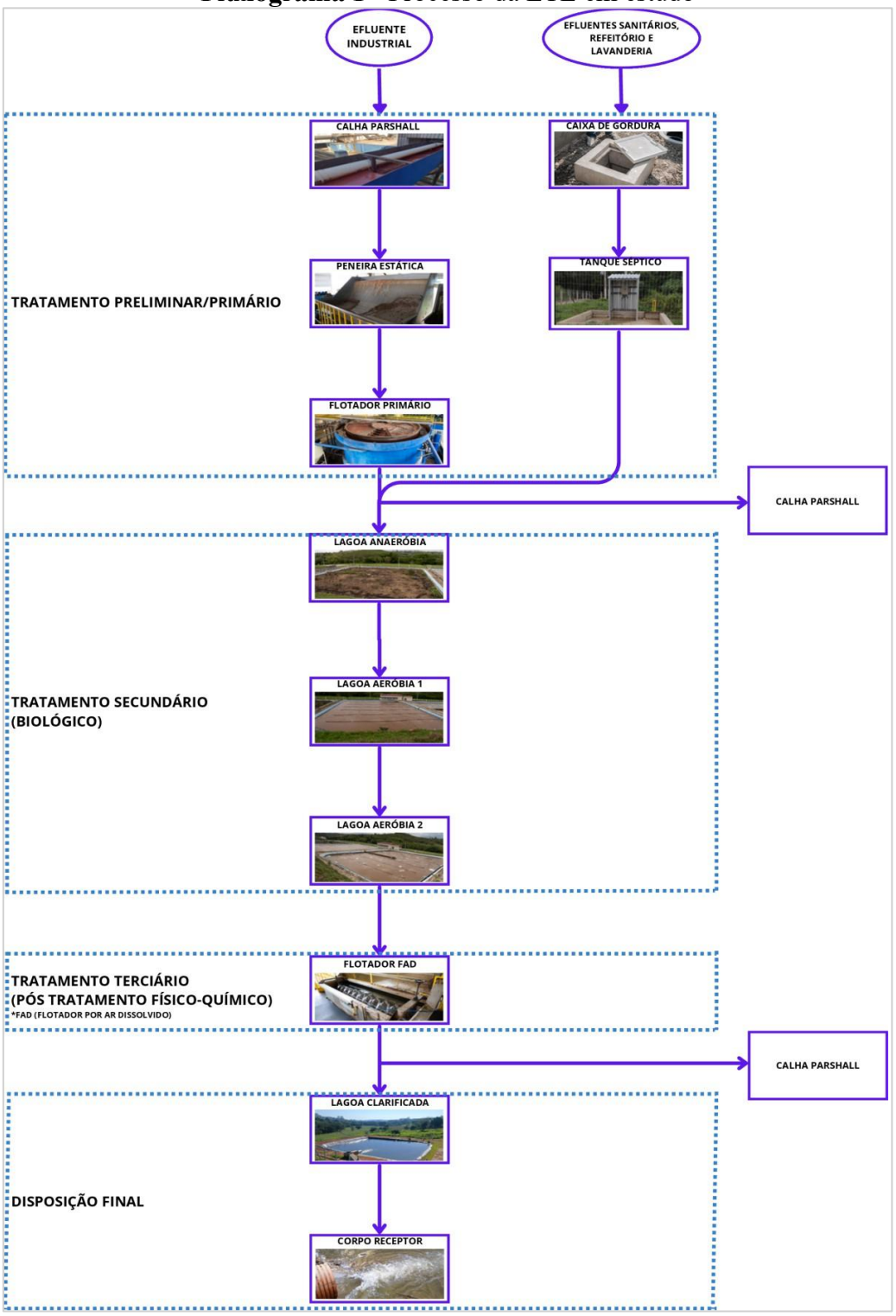


Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

O monitoramento ocorreu entre abril de 2024 e julho de 2025. O Fluxograma 1, a seguir, descreve a visão geral da ETE, contemplando suas principais etapas, os subsistemas que a compõem e as interações estabelecidas entre eles. Esse fluxograma funciona como eixo

orientador para a compreensão do processo como um todo e deve ser consultado ao longo da leitura, uma vez que facilita a identificação da sequência operacional e dos pontos críticos de controle.

Fluxograma 1 - Processo da ETE em estudo



Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

Conforme ilustrado no fluxograma, o sistema é estruturado em quatro etapas principais, que integram processos físicos, biológicos e químicos. Inicialmente, o Tratamento Preliminar/Primário processa o efluente industrial por meio de calha Parshall, peneira estática e flotador primário, enquanto os efluentes provenientes dos setores sanitários, refeitório e lavanderia passam por caixa de gordura e tanque séptico antes de convergirem para a etapa biológica. O Tratamento Secundário (Biológico) é constituído por um sistema de lagoas em série, composto por uma lagoa anaeróbia, seguida por duas unidades aeróbias, identificadas como lagoa aeróbia 1 e lagoa aeróbia 2. Na sequência, o Tratamento Terciário (Pós-Tratamento Físico-Químico) é representado pelo flotador por ar dissolvido (FAD), que atua como unidade de polimento final do efluente. Por fim, a Disposição Final compreende a passagem do fluxo pela lagoa clarificada para o posterior descarte monitorado no corpo receptor. Os detalhes operacionais da ETE serão descritos no tópico a seguir.

Para fins de monitoramento, as unidades operacionais foram padronizadas conforme o Quadro 3.

Quadro 3 – Codificação e descrição das unidades operacionais da estação de tratamento de efluentes (ETE)

Unidades Operacionais	Identificação
Água residuária (entrada do sistema)	AR
Tratamento primário	1LA
Reator anaeróbio	2LA
Reator aeróbico 1	3LA
Afluente do sistema de flotação (reator aeróbico 2)	4FT
Efluente tratado (saída pós-FAD)	5ET

Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

4.3.2 Detalhamento Operacional dos Processos da ETE

Este capítulo apresenta detalhadamente os processos da ETE estudada. Dados de dimensionamento e operação são apresentados, bem como fotos e fluxogramas. Para maior entendimento, recomenda-se acompanhar o referencial teórico geral para os processos correspondentes, apresentado nas seções anteriores, e comparar com as particularidades e dados dos sistemas estudados na parte prática deste trabalho.

As águas residuárias industriais são geradas em diversos setores do processo produtivo do complexo industrial da ETE em estudo, com as seguintes contribuições: operações de abate

de aves; sistemas de condensação de gases da graxaria; lavagem e limpeza de tubulações, caminhões, tanques de processo, pisos e demais equipamentos relacionados direta ou indiretamente ao processo produtivo; soluções utilizadas na higienização de equipamentos e pisos, incluindo detergentes neutros, alcalinos, ácidos e desinfetantes; vazamentos eventuais de lubrificantes de equipamentos, como óleos de redutores e compressores de refrigeração; purgas do sistema de geração de vapor, incluindo descargas de fundo, condensados da rede de vapor e descarte proveniente de torres de resfriamento e condensadores evaporativos; efluentes gerados nas áreas de sanitários, refeitórios e lavanderia.

a) Tratamento Preliminar: Água Residuária (AR)

Inicialmente, os despejos industriais passam por um sistema de peneiramento, com o objetivo de separar os sólidos grosseiros. Este sistema é composto por peneiras estáticas, ilustradas na Figura 4.

Figura 4 – Peneiras Estáticas do Sistema Estudado



Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

Nessa fase, passa-se também pela caixa de gordura do refeitório, que se destina a remover óleos, gorduras e sólidos presentes nos efluentes domésticos do empreendimento. Após essa etapa preliminar, os efluentes industriais são encaminhados a uma calha *Parshall* (Figura 5) e, então, para o sistema de flotação convencional. A caixa de distribuição de fluxo destina-se a distribuir de forma homogênea o ingresso do efluente para a unidade subsequente.

Figura 5 – Calha *Parshall*



Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

b) Tratamento Primário: Coagulação, Floculação e Flotação (1LA)

O tratamento primário é constituído por um sistema de flotação convencional com adição de coagulante e floculante. A flotação é uma operação unitária utilizada para separar partículas líquidas ou sólidas de uma fase líquida. Consegue-se a separação introduzindo pequenas bolhas de gás (geralmente ar) na água residuária. As bolhas aderem-se às partículas, e a força ascendente do conjunto partícula-bolha é tal que faz com que as partículas subam até a superfície. Desta forma, faz-se ascender até a superfície partículas de densidade maior que as do líquido. Além disso, utiliza-se flotação no tratamento de água residuária tanto na eliminação do material suspenso quanto para concentração do lodo biológico.

Após a retirada de resíduos sólidos grosseiros no tratamento preliminar, são adicionados produtos químicos coagulantes e floculantes ao efluente. O produto coagulante policloreto de alumínio (PAC) atua neutralizando a carga elétrica das partículas no efluente, permitindo a formação de coágulos. Em seguida, é adicionado produto floculante como o polímero aniônico, que atua na aglutinação dos resíduos coagulados facilitando a formação de flocos maiores.

Após a adição de produto coagulante e floculante, ocorre a aglomeração dos resíduos presentes no efluente formando um lodo na superfície do flotador (Figura 6), sendo que o lodo permanece na superfície do tanque através do sistema de formação de microbolhas. O raspador

do flotador remove o lodo suspenso, direcionando-o para o tanque de lodo.

Figura 6 – Flotador Primário do Sistema Estudado



Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

O flotador do sistema é cilíndrico e dotado de sistema de aeração por ar difuso com capacidade de raspagem automática de lodo. As características gerais do flotador estão descritas na Tabela 6.

Tabela 6 – Dimensões do Flotador Estudado

Profundidade útil	Diâmetro interno	Área superficial	Volume
2,4 m	7 m	38,48 m^2	92,36 m^3

Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

O flotador primário, em conjunto com as peneiras, é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Flotador Primário e Peneiras



Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

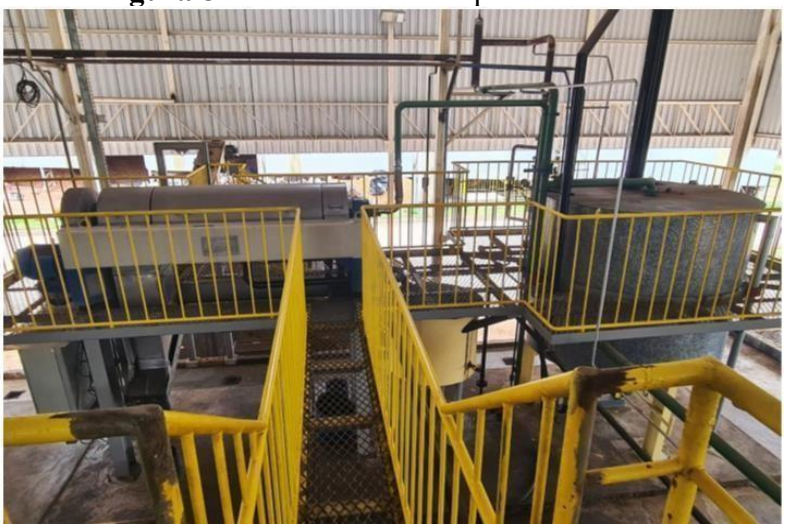
c) Tratamento Primário: Tanque de Lodo Cozido e Tridecanter (1LA)

O resíduo retirado do flotador é lançado em um tanque de lodo, denominado “tanque de lodo cozido”, que é aquecido a uma temperatura ideal entre 95°C e 98°C. O lodo é uma mistura de substâncias que contém minerais, coloides e materiais orgânicos decompostos. Podemos citar, por exemplo, argila, silte, areia fina, microrganismos e produtos provenientes dos processos de coagulação. A geração média de lodo é de100.000 kg/mês na ETE em estudo.

A finalidade desse tanque é proporcionar um local adequado para a separação e estabilização desses resíduos. O aquecimento tem como objetivo promover a estabilização do lodo e reduzir sua quantidade, tornando-o mais adequado para a destinação final. Com o aquecimento controlado, o volume do lodo é reduzido.

Após o aquecimento e a estabilização do lodo, ele é redirecionado ao Tridecanter (Gratt) (Figura 8), com vazão nominal de 10 m3/h e concentração de sólidos superior a 20.000 mg/L.

Figura 8 – Tridecanter e tanque de cozimento



Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

Este equipamento utiliza a força centrífuga para promover a separação das substâncias presentes no lodo tratado. Nesse processo, ocorre a divisão do lodo em três componentes:

1) Óleo: o óleo presente no lodo é separado e será reintegrado ao processo produtivo da Fábrica de Farinha e Óleo (FFO);
2) Água: a água tratada, que passou pelo processo de coagulação, floculação e posterior estabilização térmica, é separada no Tridecanter e retorna para o flotador primário. Essa recirculação é importante para que a água continue

passando por etapas de tratamento adicionais e alcance os padrões de qualidade estabelecidos pelas análises químicas, especialmente em relação à DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e à DQO (Demanda Química de Oxigênio);

3) Resíduo Sólido: também conhecido como lodo desidratado, é separado no Tridecanter e direcionado para caçambas, agora em sua forma mais estável, onde será coletado e posteriormente destinado para a compostagem, que é um processo biológico que utiliza os resíduos orgânicos como matéria-prima para produzir adubo orgânico.

d) Tratamento Secundário: reator anaeróbio, aeróbico 1 e 2 (2LA, 3LA e 4 FT)

O tratamento biológico é responsável pela etapa final de controle, estabilizando a matéria orgânica e sua correspondente redução da demanda de oxigênio. O tratamento secundário da ETE estudada é constituído por uma lagoa anaeróbia e duas lagoas aeradas (Figuras 9-11).

Figura 9 – Lagoa anaeróbia



Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

Figura 10 – Primeira lagoa aeróbia



Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

Figura 11 – Segunda lagoa aeróbia



Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

A lagoa anaeróbia destina-se principalmente aos processos biológicos de transformação de parte da matéria carbonácea em metano e gás carbônico, bem como a transformação do nitrogênio orgânico em nitrogênio amoniacal. As dimensões da lagoa anaeróbia estão apresentadas na Tabela 7, a seguir.

Tabela 7 – Dimensões da lagoa anaeróbia

Dimensão		**Valor**
Base maior	Largura	55 m
	Comprimento	54,8 m
Nível d'água	Largura	54 m
	Comprimento	53,8 m

Base menor	Largura	37,6 m
	Comprimento	37,4 m
Profundidade	Útil	8,2 m
	Total	8,7 m
Volume útil		17.309,32 m^3
Borda livre		0,5 m
Inclinação do talude		45°

Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

A utilização de lagoa aerada objetiva a decomposição da matéria orgânica residual, proveniente da lagoa anaeróbia, em termos de redução da concentração de DBO presente nos despejos. Este tipo de sistema destina-se às reações de decomposição da matéria carbonácea residual do processo anaeróbio, bem como às reações de nitrificação, para redução dos teores de nitrogênio amoniacal.

As duas lagoas aeradas utilizam sistema de aeração por ar difuso, sendo alimentadas continuamente com o efluente da lagoa anaeróbia. Na lagoa aerada, o processo aeróbio de estabilização da matéria orgânica é realizado com auxílio de um sistema de aeração para aumento da concentração de oxigênio, removendo, assim, a maior parte da DBO e DQO presentes no efluente.

No entanto, o efluente tratado da lagoa aerada possui alta concentração de sólidos suspensos, com a formação de flocos biológicos, sendo necessária a instalação, à jusante, de um sistema para sedimentação desses sólidos. As Tabelas 8 e 9 contêm o dimensionamento da primeira e segunda lagoas aeróbias, respectivamente.

Tabela 8 – Dimensões da Primeira Lagoa Aeróbia

Dimensão		**Valor**
Base maior	Largura	45,6 m
	Comprimento	55 m
Nível d'água	Largura	44,6 m
	Comprimento	54 m
Base menor	Largura	31,6 m
	Comprimento	41 m
Profundidade	Útil	7 m
	Total	7,5 m

Dimensão	Valor
Volume útil	11.852,63 m^3
Borda livre	0,5 m

Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

Tabela 9 – Dimensões da Segunda Lagoa Aeróbia

Dimensão		Valor
Base maior	Largura	45,6 m
	Comprimento	55 m
Nível d'água	Largura	44,6 m
	Comprimento	54 m
Base menor	Largura	31,6 m
	Comprimento	41 m
Profundidade	Útil	7 m
	Total	7,5 m
Volume útil		11.852,63 m^3
Borda livre		0,5 m

Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

e) Tratamento Terciário: Flotador por Ar Dissolvido (5ET)

No flotador físico-químico, ocorre a adição de coagulantes e floculantes, produtos químicos que ajudam na floculação das partículas. Este sistema de flotação destina-se a remover os sólidos em suspensão presentes nos efluentes, além de redução das concentrações de óleos e graxas.

O efluente é agitado nas chicanas de floculação, onde, através de reações químicas e do choque das partículas, há o aumento de tamanho e consolidação do floco a ser sedimentado. Os flocos formados têm aspecto gelatinoso, o que facilita o agregamento de partículas na superfície do floco original. Com esses encontros e ao longo do tempo, os flocos aumentam de tamanho e sedimentam mais facilmente. O sistema de ar difuso, em conjunto com os sopradores, executa a inspeção visual diária dos equipamentos eletromecânicos e verifica frequentemente as condições de funcionamento e normalidade do sistema de compressão, suprimento e distribuição de ar.

O flotador, modelo GFAD 350 (Gratt), apresenta forma retangular, e sua taxa de aplicação é de 4 m3/ (m2 .h), adotada como fator de segurança. A vazão de trabalho é de 350

m3/h. O decantador é centrífugo, apresenta vazão nominal de 20 m3/h e concentração de sólidos maior que 20.000 mg/L. Após o flotador físico-químico, o efluente tratado é encaminhado à lagoa de clarificação e, posteriormente, ao corpo receptor. As Figuras 12 e 13 ilustram o flotador FAD.

Figura 12 – Flotador por Ar Dissolvido



Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

Figura 13 – Saída do Flotador por Ar Dissolvido



Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

Os sistemas para disposição final, incluindo a lagoa clarificada e o lançamento ao corpo receptor, estão apresentados nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Lagoa Clarificada



Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

Figura 15 – Lançamento ao Corpo Receptor



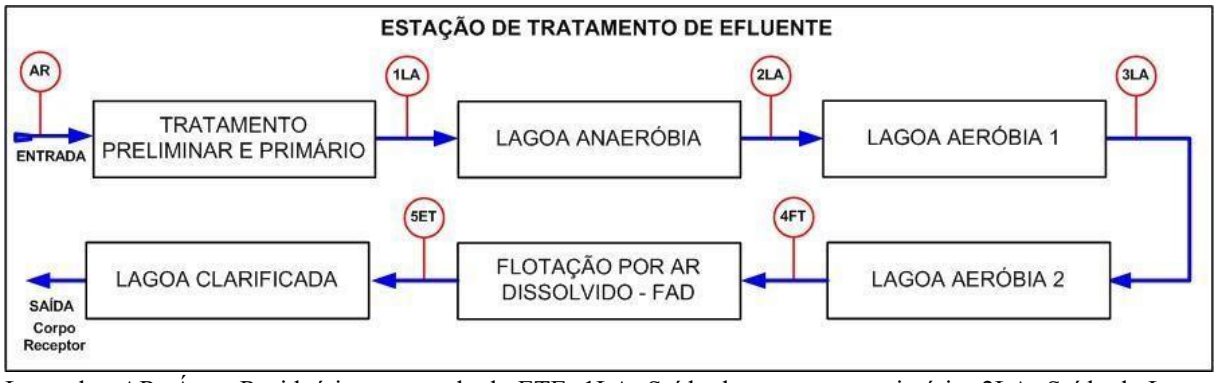
Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025).

4.3.2 Procedimentos de coleta de dados e análises dos parâmetros

Os procedimentos de coleta de dados e análise dos parâmetros físico-químicos foram estruturados em duas frentes complementares de monitoramento: longitudinal, de desempenho do sistema; e diagnóstico da eficiência por unidade operacional. O monitoramento das unidades operacionais caracterizou-se por análises diárias e semanais realizadas no laboratório da própria unidade industrial seguindo-se os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA/AWWA/WEF, 21ª edição, 2005). As análises da eficiência por unidade operacional monitoraram o perfil de remoção de poluentes ao longo das sucessivas unidades operacionais (AR: águas residuárias, 1LA:

primário, 2LA: anaeróbico, 3LA: aeróbico, 4FT: FAD e 5ET: tratado), conforme exposto no Fluxograma 2.

Fluxograma 2 – Etapas e pontos de coleta da ETE em estudo



Legenda: AR: Água Residuária na entrada da ETE; 1LA: Saída do tratamento primário; 2LA: Saída da Lagoa Anaeróbia; 3LA: Saída da Lagoa Aeróbia 1; 4FT: Saída da Lagoa Aeróbia 2(entrada FAD; 5ET: Efluente tratado após o FAD. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

O monitoramento de desempenho do sistema consistiu no levantamento de dados longitudinais abrangendo o período de 2019 a 2025. As análises de desempenho do sistema contrastaram os regimes operacionais pré e pós-implementação da unidade de flotação (FAD) em abril de 2021.

Ressalta-se que, por se tratar de um primeiro estudo, o cronograma experimental e a coleta de amostras seguiram a rotina operacional da ETE, sendo adotadas as dosagens usuais de produtos químicos definidas pela equipe técnica, além de consideradas as restrições inerentes às paradas programadas para limpeza e manutenção dos equipamentos. As coletas de efluentes seguiram os protocolos da APHA (2017) e normas técnicas da ABNT (2017), incluindo procedimentos de preservação (refrigeração a 4°C) e transporte sob condições controladas.

O desenvolvimento da pesquisa contou com a colaboração direta da equipe operacional da ETE e dos analistas de laboratório. Os operadores receberam orientações específicas quanto aos procedimentos de coleta, registro e armazenamento das amostras e dos dados operacionais, enquanto os analistas foram responsáveis pela execução das análises laboratoriais e pelo controle de qualidade dos resultados.

Todos os parâmetros monitorados neste estudo, bem como os métodos de análise e procedimentos adotados, estão detalhados no Quadro 4, abaixo.

Quadro 4 – Variáveis monitoradas do sistema de tratamento no período Pré-FAD (2019-2020) e Pós-FAD (2021-2025) e nas unidades operacionais.

Análises de desempenho do sistema (Período Pré-FAD e Pós-FAD)				
Variável	**Abreviatura**	**Unidade de Medida**	**Método de Análise**	**Norma Técnica/ Procedimento**
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	Incubação a 20 °C por 5 dias (respirométrico)	ABNT NBR 12614
Demanda Química de Oxigênio	DQO	mg/L	Refluxo fechado, espectrofotometria	SMEWW 23ª ed., 5220-D
Fósforo Total	P	mg/L	Digestão ácida, método do ácido ascórbico	SMEWW 23ª ed., 4500-P E
Nitrogênio Amoniacal	N	mg/L	Destilação e titulação	SMEWW 23ª ed., 4500-NH_3 D
Óleos e Graxas	O&G	mg/L	Extração com hexano ou solvente e gravimetria	SMEWW 23ª ed., 5520-D
Potencial Hidrogeniônico	pH	-	Potenciométrico	SMEWW 23ª ed., 4500-H^+ B
Sódio	Na	mg/L	Digestão ácida e determinação por FAAS ou ICP	USEPA 3005A
Sólidos Suspensos	SS	mg/L	Gravimétrico	ABNT NBR 10664
Sólidos Suspensos Totais	SST	mg/L	Gravimétrico	ABNT NBR 10664
Sulfetos	SUF	mg/L	Colorimétrico, calculado como LAS	SMEWW 23ª ed., 5540-C
Temperatura da Amostra	T_amostra	°C	Termométrico	SMEWW 23ª ed., 2550-B
Temperatura do Ar	T_ar	°C	Termométrico	Procedimento interno
Vazão	V	m^3/h	Medição direta	Procedimento interno
Análises de eficiência por unidade operacional (AR, 1LA, 2LA, 3LA, 4FT e 5ET)				
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg/L	Incubação a 20 °C por 5 dias (respirométrico)	ABNT NBR 12614
Nitrogênio Amoniacal	N	mg/L	Destilação e titulação	SMEWW 23ª ed., 4500-NH_3 D
Sólidos Suspensos Totais	SST	mg/L	Gravimétrico	ABNT NBR 10664
Potencial Hidrogeniônico	pH	-	Potenciométrico	SMEWW 23ª ed., 4500-H^+ B

Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

A amostragem para as análises de eficiência por unidade operacional seguiu a rotina operacional do laboratório da unidade industrial, com coletas realizadas de segunda a sexta-feira em regime diário ou semanal. Os pontos de coleta adotados corresponderam aos locais de monitoramento regular da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), previamente definidos para abranger desde a entrada da água residuária (AR) até a saída pós-FAD (5ET). Essa estruturação garantiu a representatividade dos dados coletados em escala real e permitiu a comparabilidade direta entre a eficiência das diferentes unidades operacionais que compõem o sistema de tratamento.

Em decorrência dessa dinâmica operacional e da disponibilidade de dados ao longo do período de estudo, o número de observações (n) apresentou variações entre os parâmetros monitorados, refletindo as diferentes intensidades de manejo da estação. Especificamente, foram contabilizadas 289 amostras para o pH, 224 para o Nitrogênio Amoniacal (N), 146 para Sólidos Suspensos Totais (SST) e 58 para DBO, enquanto os demais parâmetros registraram 225 observações. Essa heterogeneidade no tamanho amostral decorre da frequência de monitoramento específica exigida por cada variável.

A Figura 16 é um registro do momento da análise de DBO no laboratório.

Figura 16 - Análises de amostras para determinação da DBO em laboratório



Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2025)

Os parâmetros selecionados para as análises de desempenho do sistema (Quadro 4) foram obtidos a partir de coletas realizadas nos pontos de entrada do sistema (água residuária) e de saída (efluente tratado), o que possibilitou uma avaliação longitudinal do desempenho do sistema de tratamento, contemplando os períodos anterior e posterior à implantação do FAD (SMEWW, 2017; USEPA, 2007).

A primeira etapa da coleta de dados consistiu no levantamento sistemático do histórico de resultados analíticos de efluentes disponíveis nos arquivos institucionais, referentes às análises realizadas por laboratórios externos acreditados no período de 2019 a 2025. Esses dados foram utilizados com o objetivo de compor uma base histórica consistente e representativa do desempenho da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) ao longo do tempo.

Durante a etapa inicial de levantamento, constatou-se que os registros se encontravam armazenados de forma fragmentada, distribuídos em diferentes formatos, documentos e meios

de armazenamento, o que dificultava a consolidação das informações, a comparação entre períodos distintos e a realização de análises estatísticas mais aprofundadas sobre o desempenho do sistema de tratamento.

Diante dessa limitação e previamente à aplicação de métodos estatísticos e à análise crítica dos resultados, foi desenvolvida uma planilha de controle padronizada para a organização, sistematização e consolidação dos dados. Essa ferramenta foi estruturada de modo a permitir a uniformização das informações, a rastreabilidade dos resultados e a identificação de padrões e tendências temporais, além de facilitar a comparação entre diferentes anos e condições operacionais.

4.4 Análises Estatísticas

Inicialmente, realizou-se uma análise estatística descritiva para a caracterização geral dos dados. Posteriormente, para ambas as abordagens, aplicou-se o teste de Shapiro-Wilk (α = 0,05) para verificar a normalidade das distribuições. Dados censurados (abaixo do limite de detecção - LOD) foram tratados pelo critério de Zar (LOD/2), com exceção para as variáveis T_amostra, T_ar e V, que foram analisadas por estatística descritiva.

Nas análises de desempenho do sistema, variáveis que não violaram os pressupostos de normalidade foram comparadas pelo Teste t de Student, enquanto as não paramétricas (maioria dos parâmetros de efluentes) foram submetidas ao teste de Wilcoxon-Mann-Whitney (α = 0,05).

A avaliação da eficiência de remoção de todos os componentes avaliados, exceto pH, T_amostra, T_ar e V, foi segmentada em dois períodos operacionais: pré-FAD e pós-FAD. Para o cálculo da eficiência de remoção (E%), utilizou-se a relação entre as concentrações das águas residuárias$[AR]$ e do efluente tratado $[ET]$, conforme a Equação 1:

$$E(\%) = \frac{[AR]-[ET]}{[AR]} x100 \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Os dados de concentrações das variáveis analisadas e as eficiências de remoção calculadas também foram submetidos, inicialmente, ao teste de Shapiro-Wilk (α = 0,05) para verificação da normalidade. Em todos os casos em que a hipótese nula de normalidade foi rejeitada ($p < 0,05$), as comparações estatísticas entre os períodos Pré-FAD e Pós-FAD foram realizadas por meio do teste não paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney α = 0,05). Além

disso, a hipótese nula (H_0), em todos os casos, assumiu a inexistência de diferença estatística para a eficiência de remoção dos componentes entre os períodos avaliados.

Nas análises por unidade operacional, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de comparações múltiplas de Dunn, com correção de Bonferroni, para identificar as etapas com diferenças significativas entre si. A hipótese nula (H_0), em todos os casos, assumiu a inexistência de diferença estatística entre os períodos ou unidades operacionais. Todas as análises estatísticas foram conduzidas no *software* RStudio (R CORE TEAM, 2023).

4.5 Elaboração do Procedimento Operacional Padrão (POP) para o sistema FAD

A padronização de rotinas operacionais constitui uma estratégia fundamental para a mitigação de falhas e a garantia da qualidade em sistemas de tratamento de efluentes industriais. No presente estudo, o desenvolvimento de um Procedimento Operacional Padrão (POP) (Apêndice A) para o sistema de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) foi fundamentado no diagnóstico operacional prévio da ETE, o qual identificou instabilidades no desempenho e uma dependência de ajustes empíricos por parte dos operadores.

O processo de elaboração do documento foi conduzido sob uma abordagem aplicada e descritiva, estruturada em três etapas principais:

1) Levantamento e Diagnóstico Operacional: realizaram-se a coleta e sistematização de dados por meio de observação direta e análise documental. Foram catalogados os fluxogramas de processo, as especificações técnicas dos equipamentos, os produtos químicos utilizados (coagulantes e floculantes) e as rotinas de manutenção previamente adotadas. Esta fase permitiu a identificação dos pontos críticos de controle na etapa físico-química de polimento.

2) Estruturação Técnica do Documento: com base nos dados coletados, o POP foi organizado em módulos operacionais específicos para garantir a reprodutibilidade das ações. A estrutura contemplou: (i) descrição do princípio de funcionamento do FAD; (ii) detalhamento das etapas de coagulação e floculação; (iii) diretrizes para o preparo e dosagem de produtos químicos; (iv) rotinas de operação de bombas e raspadores; e (v) plano de contingência para falhas operacionais. A redação priorizou o uso de linguagem técnica objetiva para minimizar a subjetividade na execução das atividades.

3) Validação e Consolidação: a consistência técnica do procedimento foi validada de forma integrativa, confrontando as rotinas estabelecidas com os dados históricos de

desempenho da ETE, as recomendações da literatura especializada e as diretrizes contidas nos manuais dos fabricantes dos equipamentos.

No contexto desta pesquisa, o POP transcende a função de guia instrutivo, configurando-se como uma ferramenta de gestão estratégica. Sua implementação visa transformar o conhecimento empírico em procedimentos científicos estruturados, estabelecendo critérios técnicos para o monitoramento contínuo e assegurando a resiliência e a estabilidade na qualidade do efluente final.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados foi estruturada para contrastar o desempenho histórico da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) com o diagnóstico atual de suas unidades operacionais. A discussão integra os achados experimentais às evidências científicas levantadas na Revisão Sistemática de Literatura (RSL), permitindo validar a eficácia da tecnologia de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) frente aos desafios da agroindústria avícola.

5.1 Síntese de evidências da Revisão Sistemática de Literatura (RSL)

Este capítulo apresenta os resultados da Revisão Sistemática realizada. O Quadro 5, a seguir, apresenta os artigos com avaliação da eficiência do sistema FAD integrado aos processos de tratamento primário e terciário de efluentes em frigoríficos. A inclusão dos estudos foi confirmada por meio da análise detalhada de títulos, resumos e, quando necessário, do texto completo, seguindo-se os critérios de elegibilidade definidos na metodologia da pesquisa.

Esses estudos oferecem contribuições para a compreensão dos desafios enfrentados na gestão de efluentes na indústria avícola, destacando tecnologias aplicadas, resultados operacionais e impactos sobre a conformidade regulatória. Os artigos abordam diferentes aspectos do tratamento de efluentes industriais, incluindo desempenho operacional de sistemas de flotação, estratégias de polimento de efluentes pós-processos anaeróbicos e o atendimento a padrões ambientais vigentes. As informações essenciais de cada artigo foram sistematizadas no quadro a seguir.

Quadro 5 – Apresentação do título, objetivos e resultados principais dos trabalhos encontrados a partir da Revisão Sistemática de Literatura (RSL). (Continua)

Título	Objetivo	Resultados	Referências
Diagnóstico e quantificação de efluentes gerados em um frigorífico localizado no sudoeste do estado do Paraná	Propor ações de melhoria estruturais e operacionais para o sistema de tratamento de efluentes de um frigorífico no Sudoeste do Paraná.	A flotação foi responsável pela remoção da maior parte da carga do efluente, sendo de extrema importância para o sistema. Das quatro modificações sugeridas, apenas uma foi concluída, contribuindo para a melhoria do sistema e redução da carga lançada ao corpo hídrico receptor.	Montagna (2015)
Determinação das condições operacionais para o tratamento terciário de efluente frigorífico pelo processo integrado Fenton-Coagulação	Aplicar uma alternativa de pré-tratamento para efluentes industriais com alta carga orgânica, provenientes de uma agroindústria que produz balas de gomas à base de amido.	O método proposto para pré-tratamento foi satisfatório, com redução de carga orgânica (DQO) acima de 31%, diminuindo o fator poluidor em no mínimo 25,38%, impactando diretamente na redução das tarifas de descarte.	Almeida *et al.* (2015)
Diagnóstico e Prognóstico de um Sistema de Efluente de Frigorífico de Suínos para Remoção de Nitrogênio Amoniacal	Caracterizar uma planta de efluentes de um abatedouro e frigorífico de suínos, composta por tratamento preliminar, primário, secundário e pós-tratamento.	A melhor opção foi o espessamento do lodo para uso agrícola e modificação do sistema de lagoa aerada para lodo ativado, com capacidade de remoção de 50% do nitrogênio amoniacal, melhorando o sistema e reduzindo impactos ambientais.	Assmann (2016)
Pós-tratamento físico-químico por flotação FAD em efluentes de laticínios	Comparar a eficiência de coagulantes e floculantes inorgânicos e orgânicos associados ao processo de flotação e sedimentação em escala de bancada no tratamento de efluente de uma agroindústria.	Coagulantes Novfloc e Klaraid apresentaram resultados similares, sendo eficientes na formação de flocos com características apropriadas para os processos de sedimentação e flotação.	Papp (2017)
Tratamento de Efluentes da Indústria de Frigoríficos	Apresentar uma visão geral dos frigoríficos no Brasil e suas técnicas de tratamento de efluentes.	O setor frigorífico brasileiro tem posição de destaque na economia e apresenta tendência de crescimento. Técnicas de tratamento convencionais são as mais utilizadas devido à elevada carga orgânica dos efluentes.	Cremonini, Nedel e Higarashi (2018)
Eficiência do Sistema de Tratamento de Efluentes de um Abatedouro Frigorífico	Avaliar a eficiência do sistema de lagoas de estabilização no tratamento de efluentes de um abatedouro-frigorífico no município de São Gabriel, RS.	O sistema apresentou boa eficiência na remoção de diversos parâmetros analisados, com eficiência global de 85,67%. Alguns parâmetros ultrapassaram os limites legais, indicando necessidade de melhorias.	Manzke *et al.* (2018)

Diagnóstico e proposição de melhorias no sistema de tratamento de efluentes de um abatedouro e frigorífico de aves	Caracterizar uma planta de efluentes de um abatedouro e frigorífico de aves no oeste do Paraná, avaliando sua eficiência e propondo melhorias.	Foram propostas alterações como substituição das lagoas anaeróbias por reator anaeróbio UASB e implementação de reatores anóxicos e aerados para pós-desnitrificação, visando à melhoria do sistema e redução de impactos ambientais.	Jesus (2018)
Concepção do mapa de processo e procedimento operacional padrão de uma estação de tratamento de efluentes em um frigorífico de aves	Desenvolver o Mapa de Processo e o Procedimento Operacional Padrão de uma Estação de Tratamento de Efluentes em um Frigorífico de Aves.	O mapeamento e desenvolvimento do procedimento operacional padrão contribuíram para a determinação de um *modus operandi* único e compartilhado com todos os membros da equipe.	Nardino (2019)
Pós-tratamento físico-químico por flotação FAD em efluentes de laticínios	Comparar a eficiência entre coagulantes inorgânicos e orgânicos associados ao processo de flotação e sedimentação em escala de bancada no tratamento de efluente de uma agroindústria de laticínios.	Coagulantes Novfloc e Klaraid apresentaram resultados similares, sendo eficientes na formação de flocos com características apropriadas para os processos de sedimentação e flotação.	Corso, Papp e Mees (2019)
Avaliação de ultrafiltração como alternativa à flotação por ar dissolvido no pós-tratamento do efluente de lodos ativados – estudo em escala-piloto na estação de tratamento de esgoto Brasília Norte	Avaliar a ultrafiltração (UF), precedida por coagulação com sulfato de alumínio, como alternativa ao processo tradicional de flotação por ar dissolvido (FAD) na etapa de polimento final das estações de tratamento de esgoto (ETE) Brasília Norte e Sul.	A UF superou a FAD na remoção de turbidez, sólidos suspensos totais, DQO e fósforo total. A qualidade microbiológica do efluente tratado por UF foi significativamente superior, com concentrações abaixo de 200 NMP/100 mL.	Bertolossi e Brandão (2021)
Avaliação das denúncias ambientais atendidas pelo órgão ambiental estadual do Rio Grande do Sul – FEPAM - referentes às estações de tratamento de efluentes das indústrias frigoríficas e de laticínios	Levantar as denúncias ambientais atendidas pela FEPAM entre 2017 e 2021, com foco nas irregularidades relacionadas ao tratamento de efluentes em indústrias dos setores frigorífico e de laticínios.	Entre 2017 e 2021, a FEPAM atendeu 4.029 denúncias, das quais 2.374 foram consideradas procedentes. O setor industrial, especialmente os frigoríficos (20%) e laticínios (7%), foi responsável por uma parcela expressiva das infrações.	Tonietto (2022)
Otimização do sistema de tratamento composto por reator eletroquímico, seguido por flotação por ar dissolvido: aplicação em efluente de frigorífico e matadouro de suínos	Avaliar o desempenho da eletrocoagulação em um reator em batelada cilíndrico, seguido pela flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes de um frigorífico e matadouro de suínos.	O processo de eletrocoagulação, seguido pela flotação por ar dissolvido, apresentou eficiência superior a 80% na remoção de DQO, turbidez e cor. O consumo de energia variou entre 447,20 e 2.060,97 Wh/m³ de efluente tratado.	Bocchi (2022)
Os impactos ambientais de efluentes industriais: o caso do Frigorífico São Francisco em Redenção-PA	Analisar as etapas e os impactos ambientais de efluentes industriais provocados pelo frigorífico.	A pesquisa identificou as formas de tratamento dos efluentes e observou a legislação pertinente, como a RIISPOA, Portaria n.º 365/2017 do MAPA, CONAMA, entre outras.	Sousa e Siqueira (2022)

Aplicação de pré-tratamento para redução de poluentes orgânicos em efluentes de uma agroindústria	Aplicar uma alternativa de pré-tratamento para efluentes industriais com alta carga orgânica, provenientes de uma agroindústria que produz balas de gomas à base de amido.	A aplicação do reagente Fenton reduziu a carga orgânica inicial, desde que encontrada a razão adequada entre Fe^{2+}/H_2O_2, levando em consideração a composição do efluente industrial.	Frigulio (2023)
Tratamento de efluentes agroindustriais: uma revisão sistemática	Realizar uma revisão sistemática e levantamento quantitativo de artigos científicos sobre o tratamento de efluentes agroindustriais, focando nos processos aeróbios e anaeróbios.	Os efluentes agroindustriais são caracterizados por sua complexidade e variabilidade química, podendo conter substâncias tóxicas, nutrientes em excesso, sólidos suspensos, óleos, gorduras, produtos químicos de limpeza e, em alguns casos, patógenos.	Pereira e Hoffmann (2024)
Poultry slaughterhouse wastewater treatment plant for high quality effluent	Avaliar a eficiência de uma estação de tratamento de efluentes de abatedouro de aves (ETE) composta por FAD, reator UASB, lagoa aerada facultativa (AFP) e FAD químico, visando atender aos padrões ambientais e propor alternativas de reúso	O sistema apresentou elevadas eficiências de remoção: COD (97,9%), DBO (98,6%) e O&G (91,1%). O fósforo foi reduzido a 1,34 mg/L, e o nitrogênio amoniacal, a 17 mg/L no efluente final. O arranjo mostrou estabilidade operacional, adequação aos padrões de lançamento e potencial de reúso interno na indústria, com possibilidade de reduzir até 50% do consumo de água de poço.	Del Nery *et al.* (2016)
Comparative study of electrochemical hybrid systems for the treatment of real wastewaters from agri-food activities	Investigar a eficiência de processos eletroquímicos (EOR, EC e sua combinação) no tratamento de efluentes de abatedouro de aves (SHWW) e laticínios (DWW).	O processo EOR foi mais eficiente na remoção de DQO, nitratos e amônia; o EC apresentou melhor remoção de fosfatos e menor custo energético (0,01 kWh/g DQO). A combinação de EOR+EC melhorou as taxas de remoção, mas com maior consumo energético.	Ghazouani *et al.* (2018)
Sustainable biological system for the removal of high strength ammoniacal nitrogen and organic pollutants in poultry waste processing industrial effluent	Desenvolver sistema biológico sequencial para remoção de nitrogênio amoniacal e poluentes orgânicos de efluente do processamento de resíduos avícolas.	O consórcio microbiano com *Paracoccus pantotrophus* FMR19 e *Bacillus albus* MN527241 obteve até 90% de redução do nitrogênio amoniacal e 98% de remoção de COD em cinco dias.	Mohan *et al.* (2020)

Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

O FAD é um processo físico-químico amplamente empregado como etapa de pós-tratamento em estações de efluentes da indústria de alimentos, especialmente em frigoríficos e laticínios, atuando como complemento da sedimentação ao remover partículas finas não eliminadas nos processos convencionais (Papp, 2017; Corso, Papp & Mees, 2019). Estudos mostram que o uso de coagulantes e floculantes inorgânicos ou orgânicos potencializa a formação de flocos, elevando a eficiência de remoção de DQO, turbidez e sólidos suspensos. Sua versatilidade permite a aplicação isolada ou integrada a outras tecnologias, como reatores eletroquímicos, processos biológicos ou ultrafiltração, ampliando o desempenho do sistema mesmo diante da variabilidade do efluente (Bocchi, 2022; Bertolossi; Nedere Brandão, 2021). Entretanto, sua eficiência depende de rigoroso controle operacional, incluindo dosagem de reagentes, tempo de retenção, pressão de saturação e taxa de recirculação - fatores essenciais para maximizar a remoção de poluentes, reduzir o consumo energético e garantir viabilidade econômica e ambiental.

Montagna (2015) investigou a geração e a composição de efluentes em frigoríficos do sudoeste do Paraná, identificando que a flotação foi responsável pela remoção da maior parte da carga poluente. O estudo ressaltou a necessidade de intervenções estruturais e operacionais para otimizar o sistema, propondo quatro modificações principais: a homogeneização do efluente no tanque de equalização, a substituição das válvulas purgadoras dos flotadores, a desativação das lagoas facultativas 1, 3 e 4, e a eliminação da recirculação de lodo dos flotadores. Embora apenas a eliminação da recirculação de lodo tenha sido efetivamente implementada durante o período da pesquisa, essa medida gerou impactos positivos na redução da carga lançada nos corpos hídricos, demonstrando que mudanças procedimentais podem elevar a eficiência do sistema sem necessidade de grandes investimentos. A análise indicou que a compreensão da variabilidade e dos volumes de efluentes é essencial para dimensionar corretamente as unidades de tratamento e planejar estratégias de mitigação (Montagna, 2015).

Assmann (2016) caracterizou um sistema de efluentes de frigoríficos de suínos, abordando desde o tratamento preliminar até o pós-tratamento. O estudo demonstrou que o espessamento do lodo para uso agrícola e a modificação do sistema de lagoa aerada para lodo ativado resultaram em redução de aproximadamente 50% do nitrogênio amoniacal. Essa intervenção mostrou-se eficaz para minimizar impactos ambientais e otimizar a reutilização de subprodutos, destacando a importância da adaptação dos processos às

características específicas do efluente.

No tratamento biológico, os biorreatores alimentados com água residuária apresentaram limitações, especialmente pela presença de óleos e graxas que comprometeram a sedimentação e reduziram a eficiência de remoção de DQO. O uso de hidrólise enzimática demonstrou potencial no pré-hidrólise de gorduras, mas a liberação de enzimas e a formação de ácidos graxos de cadeia longa provocaram inibição microbiana, limitando a eficiência global. Os melhores resultados foram alcançados pela associação entre coagulação/floculação e tratamento biológico aeróbio, que resultou em remoções médias de DQO acima de 90%. Nessa configuração, a etapa de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) ganhou relevância ao promover a separação eficiente de sólidos suspensos, óleos e graxas, reduzindo a turbidez e a carga orgânica antes da etapa biológica, garantindo maior estabilidade operacional e qualidade do efluente tratado (Castro *et al.*, 2012).

Almeida *et al.* (2015) avaliaram o processo integrado Fenton-Coagulação como uma alternativa eficaz para o tratamento terciário (polimento) de efluentes frigoríficos, visando à remoção da matéria orgânica que persiste após o tratamento biológico convencional. Sob condições operacionais otimizadas, especificamente um pH de coagulação de 5,50 e uma razão $[Fe^{+2}]/[H_2O_2]$ de 0,800, os resultados demonstraram uma eficiência de remoção de DQO de 71,24%, além de reduções na cor aparente (36,92%) e na turbidez (26,91%). A pesquisa reforça que o uso de processos de oxidação avançada (POAs) é superior às técnicas convencionais por promover a destruição efetiva de poluentes recalcitrantes em vez de apenas transferi-los de fase, garantindo que o efluente final atenda aos padrões legais de lançamento.

Frigulio (2023) investigou o impacto de pré-tratamentos físico-químicos em efluentes agroindustriais, destacando que a aplicação correta de reagentes permite a redução expressiva da carga orgânica inicial. O estudo evidenciou que o desempenho das etapas biológicas subsequentes depende da eficiência da pré-condição química, mostrando que a adaptação do processo ao tipo de efluente é determinante para atingir padrões legais de lançamento e maximizar a eficiência global do sistema.

O sistema de tratamento de efluentes de abatedouro estudado por Del Nery *et al.* (2016) também reforça a relevância da integração tecnológica. O arranjo utilizou FAD antes do reator UASB, reduzindo a carga de óleos e graxas e garantindo estabilidade operacional. O reator anaeróbio atingiu remoções de até 97,9% de DQO e 98,6% de DBO,

seguido de lagoa aerada facultativa e um FAD químico, responsável por remover fósforo e matéria orgânica residual. O estudo demonstrou que a DBO do efluente final caiu de 2.100 mg/L para cerca de 28 mg/L, atendendo aos padrões legais, embora os custos mais elevados tenham se concentrado na aeração mecânica. Além disso, o sistema mostrou potencial de reúso de até 50% da água consumida pelo setor (Del Nery *et al.*, 2016)

Cremonini, Nedel e Higarashi (2018) apresentaram uma visão abrangente sobre as técnicas de tratamento de efluentes em frigoríficos, abordando etapas primárias, secundárias e terciárias. O estudo destacou que o dimensionamento correto das unidades de tratamento e a manutenção contínua são essenciais para lidar com a sazonalidade da produção e a variabilidade da composição do efluente. Os autores enfatizaram que, apesar da ampla adoção de técnicas convencionais, a eficácia do sistema depende de integração, monitoramento e adequação das operações.

O estudo de Jesus (2018) analisou o sistema de tratamento de efluentes de um frigorífico de aves e identificou falhas na padronização de rotinas, evidenciando que a falta de monitoramento contínuo reduz a eficiência do processo. Entre as melhorias propostas, destacaram-se a substituição de lagoas anaeróbias por reatores UASB e a implantação de unidades de pós-desnitrificação para remoção de nutrientes. Nesse cenário, a tecnologia FAD insere-se como uma etapa de polimento terciário indispensável, atuando na remoção da matéria orgânica recalcitrante e dos sólidos suspensos que persistem após o tratamento biológico avançado. Em diálogo com esses achados, Tonietto (2022) reforça que tecnologias de ponta, como o FAD ou reatores de alta taxa, não são autossuficientes sem uma gestão operacional rigorosa e capacitação técnica, elementos fundamentais para assegurar a resiliência do sistema e a conformidade ambiental definitiva.

Nardino (2019) desenvolveu um mapa de processo e o Procedimento Operacional Padrão (POP) de uma estação de tratamento de efluentes em frigorífico de aves. O estudo evidenciou que o mapeamento detalhado das etapas e a padronização das atividades facilitam a identificação de pontos críticos e a execução das operações, garantindo maior consistência no tratamento. Além disso, o POP contribui para a rastreabilidade das falhas e para a melhoria contínua, permitindo que intervenções corretivas sejam aplicadas de forma estruturada e eficaz.

Efluentes de abatedouros de aves também foram tratados pelo processo de eletrocoagulação (EC) em estudo de Ghazouani *et al.* (2019). Utilizando eletrodos de aço

macio, o sistema demonstrou remoção completa de fosfatos em apenas 30 minutos e significativa redução de nitratos, embora a remoção de amônio/amônia tenha sido limitada. A geração de hidróxidos de ferro durante o processo favoreceu a adsorção de poluentes, indicando que a EC pode ser uma ferramenta complementar para remoção de nutrientes persistentes, especialmente quando combinada a outros processos físico-químicos e biológicos.

Os estudos de Papp (2017) e de Corso, Papp e Mees (2019) demonstram a eficiência da flotação por ar dissolvido (FAD) como tecnologia de pós-tratamento de efluentes de laticínios, evidenciando sua capacidade de remover partículas finas e reduzir turbidez, DBO e DQO em complemento à sedimentação convencional. Essa aplicação deve ocorrer, especificamente, quando há necessidade de remover sólidos finos, gorduras e carga orgânica residual não sedimentável que persistiu ao tratamento biológico anterior. O emprego da FAD nessas situações é fundamental em efluentes industriais com alta variabilidade de composição, visando proteger e otimizar etapas biológicas subsequentes, as quais possuem limitações na degradação de substâncias recalcitrantes ou tóxicas, e assegurar o atendimento a padrões mais rigorosos de qualidade do efluente final. Enquanto Papp (2017) destaca a importância do controle operacional estrito na dosagem de coagulantes, Corso, Papp e Mees (2019) confirmam a versatilidade do sistema ao utilizar coagulantes inorgânicos e orgânicos para garantir a flotação eficiente sob diferentes condições industriais.

Os resultados apresentados por Manzke *et al.* (2018) evidenciam que sistemas convencionais, como lagoas de estabilização, podem apresentar desempenho insatisfatório quando não há monitoramento contínuo e adequada gestão operacional, resultando em não conformidades com os padrões legais. Esse cenário reforça a necessidade de adoção de tecnologias complementares capazes de aumentar a eficiência do tratamento.

Nesse contexto, estudos como o de Bertolossi e Neder Brandão (2021) demonstram que tecnologias avançadas, como a ultrafiltração, podem apresentar desempenho superior ao da flotação na remoção de sólidos e matéria orgânica; contudo, esses sistemas demandam maior complexidade operacional e custos elevados. Assim, a flotação por ar dissolvido posiciona-se como uma alternativa intermediária, capaz de promover ganhos significativos na qualidade do efluente com maior viabilidade técnica e operacional, especialmente para aplicações em frigoríficos.

Bocchi (2022) demonstrou que a combinação entre reator eletroquímico e flotação por ar dissolvido no tratamento de efluentes de frigoríficos de suínos alcança mais de 80% de remoção de DQO, turbidez e cor, embora com consumo energético relativamente elevado, reforçando a necessidade de controle operacional preciso. Em complemento, Almeida *et al.* (2015) mostraram que outras combinações químicas, como o processo Fenton, seguido de coagulação, podem ser mais eficazes em efluentes com grande variabilidade de composição, evidenciando que não há solução única e que a integração tecnológica deve ser ajustada às características específicas de cada indústria, para garantir maior eficiência no tratamento.

Sousa e Siqueira (2022) analisaram os impactos ambientais de efluentes industriais, com ênfase na contaminação de corpos hídricos pelo Frigorífico São Francisco em Redenção-PA. O estudo identificou que o manejo inadequado dos efluentes contribui para a eutrofização e alterações na biodiversidade aquática, ressaltando a necessidade de gestão ambiental integrada, fiscalização contínua e adoção de tecnologias compatíveis com padrões legais de lançamento.

Tonietto (2022) realizou levantamento de denúncias ambientais atendidas pelo órgão estadual FEPAM, focando em estações de tratamento de frigoríficos e laticínios entre 2017 e 2021. Foram registradas 4.029 denúncias, das quais 2.374 foram consideradas procedentes, sendo que setores industrializados, principalmente frigoríficos e laticínios, concentraram parcela significativa das infrações. O estudo evidencia que falhas recorrentes em operação e licenciamento são fatores críticos para a ineficiência ambiental e a necessidade de políticas de fiscalização e capacitação de pessoal.

Pereira e Hoffmann (2024) realizaram revisão sistemática sobre o tratamento de efluentes agroindustriais, identificando crescimento de estudos voltados a reatores anaeróbios combinados com polimento físico-químico. As autoras destacam que as tecnologias híbridas são mais eficazes na remoção de poluentes complexos e adaptáveis à variabilidade dos efluentes. O estudo enfatiza a importância de soluções tecnológicas personalizadas que equilibrem eficiência, viabilidade econômica e conformidade ambiental, reforçando a tendência de integração de processos em sistemas agroindustriais.

Os estudos analisados demonstram que a eficiência dos sistemas de tratamento de efluentes depende da correta escolha das tecnologias, do dimensionamento adequado das unidades de tratamento e do monitoramento constante dos parâmetros operacionais. Montagna (2015) e Assmann (2016) evidenciam a importância de ajustar os sistemas às

características específicas dos efluentes, considerando tanto a carga orgânica quanto nutrientes persistentes, como o nitrogênio amoniacal.

As tecnologias de pré-tratamento e pós-tratamento químico e físico, como o processo Fenton-Coagulação (Almeida *et al.*, 2015; Frigulio, 2023) e a flotação por ar dissolvido (Papp, 2017; Corso, Papp & Mees, 2019), se mostram essenciais para reduzir a carga orgânica e poluentes refratários, potencializando o desempenho das etapas biológicas subsequentes. A escolha e o controle dessas tecnologias dependem da composição do efluente e da capacidade operacional da estação de tratamento.

A integração de processos, incluindo reatores biológicos, eletrocoagulação, flotação, ultrafiltração e reatores UASB, tem se destacado como tendência nas pesquisas mais recentes (Bocchi, 2022; Bertolossi; Nedere Brandão, 2021; Pereira; Hoffmann, 2024). Esses arranjos, combinados, permitem alcançar padrões mais rigorosos de remoção de DQO, turbidez, sólidos suspensos e nutrientes, evidenciando que soluções híbridas são mais eficazes para atender às demandas ambientais complexas das indústrias de alimentos.

Os estudos também indicam que fatores de gestão e operação são determinantes para a eficiência ambiental. Jesus (2018), Nardino (2019), Manzke *et al.* (2018) e Tonietto (2022) destacam que padronização de procedimentos, monitoramento contínuo, capacitação de operadores e fiscalização regulatória são essenciais para reduzir falhas, evitar impactos ambientais e garantir conformidade legal. A eficiência técnica depende tanto da tecnologia quanto da capacidade de gestão e operação integrada.

Além da eficiência na remoção de partículas e carga orgânica, a flotação por ar dissolvido apresenta considerações importantes quanto ao consumo energético. Estudos demonstram que a pressão necessária para saturar o ar no efluente, aliada à manutenção de bombas e sistemas de recirculação, influencia diretamente no custo operacional. Bocchi (2022) indicou que o consumo variou entre 447,20 e 2.060,97 Wh/m³, dependendo do tipo de efluente e do arranjo operacional, mostrando que a otimização energética é fundamental para a viabilidade econômica do processo.

A análise de custos também deve considerar a aquisição e o manejo de coagulantes e floculantes. Papp (2017) e Corso, Papp e Mees (2019) destacam que a escolha entre coagulantes orgânicos ou inorgânicos influencia a eficiência na formação de flocos e também o impacto ambiental do lodo gerado. Assim, a seleção criteriosa dos reagentes e a avaliação do ciclo de vida do lodo resultante são essenciais para garantir

sustentabilidade e conformidade ambiental. Por outro lado, Bertolossi e Nedere Brandão (2021) indicam que a ultrafiltração apresenta desempenho superior em turbidez, sólidos suspensos e fósforo total. Essa diferença evidencia que a escolha tecnológica deve considerar não apenas a eficiência, mas também a composição do efluente e os custos operacionais envolvidos.

Outro ponto relevante refere-se à adaptabilidade do FAD em sistemas de tratamento híbridos. Pereira e Hoffmann (2024) evidenciam que a combinação de reatores anaeróbios, processos físico-químicos e polimento final por flotação permite tratar efluentes com alta variabilidade de composição, comuns em frigoríficos e laticínios. Essa flexibilidade possibilita que o sistema seja dimensionado de forma modular, facilitando expansões e ajustes frente a mudanças na produção ou nas normas ambientais.

A gestão integrada das estações de tratamento, contemplando operação, manutenção e capacitação de pessoal, é um fator decisivo para a eficiência do FAD. Jesus (2018), Nardino (2019) e Manzke *et al.* (2018) destacam que a falta de monitoramento contínuo, padronização de procedimentos e rastreabilidade compromete o desempenho do sistema. Portanto, não basta investir em tecnologia; é necessário implementar protocolos claros e treinamentos regulares para operadores.

O impacto ambiental de efluentes mal tratados reforça a importância da adoção de tecnologias como o FAD. Sousa e Siqueira (2022) evidenciam que o lançamento inadequado de efluentes pode causar eutrofização, alterações na biodiversidade aquática e contaminação de corpos hídricos. A eficiência da flotação contribui para a remoção de nutrientes e matéria orgânica residual, minimizando tais impactos e auxiliando na recuperação ambiental de regiões próximas a frigoríficos e agroindústrias.

Pesquisas recentes evidenciam avanços relevantes na integração do FAD com processos eletroquímicos, ultrafiltração e reatores biológicos, indicando que essas combinações ampliam a remoção de poluentes complexos e atendem a padrões de qualidade da água cada vez mais rigorosos (Bertolossi, Nedere Brandão, 2021; Bocchi, 2022). Essa tendência aponta para sistemas de tratamento mais compactos, eficientes e com menor geração de resíduos secundários. Paralelamente, a literatura destaca a importância da padronização e documentação das operações: Nardino (2019) demonstra que a adoção de Procedimentos Operacionais Padrão (POP) favorece a identificação rápida de falhas, facilita intervenções corretivas e assegura maior consistência no desempenho da FAD, sendo uma prática essencial para indústrias que buscam

certificações ambientais e maior conformidade regulatória.

A literatura sugere que o futuro do FAD está ligado à sustentabilidade e à personalização de processos. A combinação de monitoramento em tempo real, automação, coagulantes menos impactantes e arranjos híbridos possibilita tratar efluentes complexos de forma eficiente, econômica e ambientalmente responsável. Pereira e Hoffmann (2024) reforçam que tecnologias híbridas e adaptáveis serão cada vez mais necessárias para atender às exigências regulatórias e às metas de sustentabilidade do setor agroindustrial.

Apesar de consolidada como uma tecnologia eficaz para a remoção de sólidos suspensos e contaminantes específicos, a flotação por ar dissolvido ainda enfrenta limitações relacionadas principalmente ao consumo energético e à necessidade de ajustes finos nos parâmetros operacionais. Estudos recentes demonstram que, embora avanços como a integração com processos eletroquímicos ou membranas aumentem a eficiência, também elevam os custos de implantação e manutenção, o que exige análises de viabilidade mais aprofundadas (Bocchi, 2022; Bertolossi; Nedere Brandão, 2021).

Outro ponto crítico refere-se à geração de lodo e resíduos químicos, frequentemente subdimensionados em estudos técnicos. A destinação adequada desses subprodutos permanece como um desafio para garantir sustentabilidade ambiental, especialmente em países em desenvolvimento, onde o déficit em infraestrutura de tratamento ainda é significativo (Pereira; Hoffmann, 2024). Falhas operacionais decorrentes de gestão insuficiente e capacitação técnica limitada podem comprometer a eficiência dos sistemas, transformando um processo promissor em uma fonte de impacto ambiental e social.

A literatura revisada mostra que, apesar do potencial do FAD, utilizado como primeira etapa, pré-tratamento e, em alguns casos, como pós-tratamento, demonstra boa eficiência. No entanto, há uma lacuna na avicultura em relação à sua verdadeira aplicabilidade e eficácia. Reconhecer essas contradições permite contextualizar os dados desta pesquisa, articulando a eficiência técnica do sistema analisado às condições reais de operação e às particularidades de cada ambiente industrial.

Nesse contexto, os estudos consultados apontam que o tratamento de efluentes exige uma abordagem sistêmica que integre tecnologias adequadas às características do efluente, monitoramento contínuo, manutenção operacional e políticas de fiscalização eficazes. A combinação de processos químicos, físicos e biológicos, aliada a uma gestão

tecnicamente qualificada, é fundamental para otimizar resultados, reduzir impactos ambientais e promover a sustentabilidade socioeconômica e ambiental do setor (Montagna, 2015; Assmann, 2016; Almeida *et al.*, 2015; Frigulio, 2023; Cremonini, Nedel & Higarashi, 2018; Jesus, 2018; Nardino, 2019; Papp, 2017; Corso, Papp & Mees, 2019; Manzke *et al.*, 2018; Bertolossi & Nedere Brandão, 2021; Bocchi, 2022; Sousa & Siqueira, 2022; Tonietto, 2022; Pereira & Hoffmann, 2024).

5.2 Análises de desempenho do sistema: impacto da implementação do FAD

A avaliação do desempenho da estação de tratamento de efluentes (ETE), abrangendo os períodos pré e pós-instalação do FAD, encontra-se sintetizada na Tabela 10. Os dados compilados reúnem a estatística descritiva e os níveis de significância dos testes de hipótese para as concentrações no efluente tratado (ET) e as respectivas eficiências de remoção de cada parâmetro monitorado entre os anos de 2019 e 2025.

Tabela 10 – Síntese da estatística descritiva e inferencial das concentrações nos efluentes e eficiências de remoção nos períodos Pré e Pós-FAD. (Continua)

			Concentração (mg/L)				Eficiência de remoção (%)		
Parâmetro	**Período**	**Tipo de efluente**	**Média ± DP**	**Shapiro-Wilk (p-valor)**	**Mediana**	**Teste Hipótese (p-valor)**	**Média ± DP**	**Shapiro-Wilk (p-valor)**	**Teste Hipótese (p-valor)**
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	Pré-FAD	águas residuárias	1045,6 ± 344,8	-	937,9	-	90,5 ± 6,7**B**	0,00589	9,16e-09
		tratado	93,3 ± 63,2	0,00660	61,5**A**	9,826e-10			
	Pós-FAD	águas residuárias	913,6 ± 293,6	-	907,6	-	97,6 ± 1,7**A**	0,0000219	
		tratado	21,2 ± 15,5	1,65 e-06	17,7**B**	-			
Demanda química de oxigênio (DQO)	Pré-FAD	águas residuárias	2479,7 ± 676,2	-	2312,2	-	88,0 ± 6,0 **B**	0,165	3,60e-11
		tratado	287,3 ± 149,6	0,0744	248,6**A**	8,361e-11			
	Pós-FAD	águas residuárias	2602,1 ± 887,7	-	2624,4	-	97,0 ± 1,6**A**	0,0000556	
		tratado	75,7 ± 44,98	1,15 e-06	63,2**B**	-			
Fósforo total (P)	Pré-FAD	águas residuárias	11,0 ± 17,2	-	6,2	-	53,0 ± 24,6**B**	0,453	0,00892
		tratado	8,1 ± 19,7	2,510e-09	4,2	0,05699			

			Concentração (mg/L)				Eficiência de remoção (%)		
Parâmetro	**Período**	**Tipo de efluente**	**Média ± DP**	**Shapiro-Wilk (p-valor)**	**Mediana**	**Teste Hipótese (p-valor)**	**Média ± DP**	**Shapiro-Wilk (p-valor)**	**Teste Hipótese (p-valor)**
Nitrogênio amoniacal (N)	Pós-FAD	águas residuárias	22,0 ± 11,4	-	21,7	-	69,5 ± 19,8**A**	0,0188	0,7939
		tratado	6,6 ± 4,3	0,000377	6,0	-			
	Pré-FAD	águas residuárias	31,3 ± 64,9	-	12,7	-	53,8 ± 26,6	0,404	
		tratado	12,0 ± 18,0	8,26e-09	8,8	0,9639			
	Pós-FAD	águas residuárias	43,0 ± 101,0	-	12,6	-	51,5 ± 28	0,0197	
		tratado	15,0 ± 18,8	1,68e-10	8,1	-			
Óleos e graxas (O&G)	Pré-FAD	águas residuárias	51,6 ± 22,3	-	49,0	-	75,9 ± 17,8	3,36e- 7	0,08106
		tratado	13,5 ± 17,5	5,99e-10	9,2**A**	0,001184			
	Pós-FAD	águas residuárias	51,0 ± 28,6	-	44,2	-	76,6 ± 23,6	6,05e-10	
		tratado	8,4 ± 6,7	9,18e-13	9,2**B**	-			
	Pré-FAD	águas residuárias	7,4 ± 10,4	-	3,3	-	73,3 ± 28,2	2,38e-10	0,8202

			Concentração (mg/L)				Eficiência de remoção (%)		
Parâmetro	**Período**	**Tipo de efluente**	**Média ± DP**	**Shapiro-Wilk (p-valor)**	**Mediana**	**Teste Hipótese (p-valor)**	**Média ± DP**	**Shapiro-Wilk (p-valor)**	**Teste Hipótese (p-valor)**
Sólidos suspensos (SS)		tratado	4,4 ± 19,7	2,38e-10	0,5**A**	1,21e-08			
	Pós-FAD	águas residuárias	4,9 ± 6,7	-	2,0	-	75,5 ± 25,9	6,58e-11	
		tratado	0,4 ± 0,1	6,58e-11	0,2**B**	-			
Sólidos suspensos totais (SST)	Pré-FAD	águas residuárias	974,0 ± 459,5	-	888,5	-	91,6 ± 4,6**B**	7,92e-02	4,33e-09
		tratado	66,6 ± 20,4	0,147	62,8**A**	3,93e-10			
	Pós-FAD	águas residuárias	1248,1 ± 1009,0	-	992,0	-	97,4 ± 2,8**A**	2,50e-10	
		tratado	23,1 ± 17,7	7,90e-07	18,0**B**	-			
Sódio (Na)	Pré-FAD	águas residuárias	173,2 ± 60,0	-	176,5	-	30,5 ± 33.8**A**	4,92e-01	0.0000421
		tratado	107,2 ± 43,3**B**	0,133	102,5	1,18e-08			
	Pós-FAD	águas residuárias	177,4 ± 68,1	-	177,0	-	-40.3 ± 171**B**	2,70e-13	
		tratado	180,6 ± 37,0**A**	0,206	180,0	-			

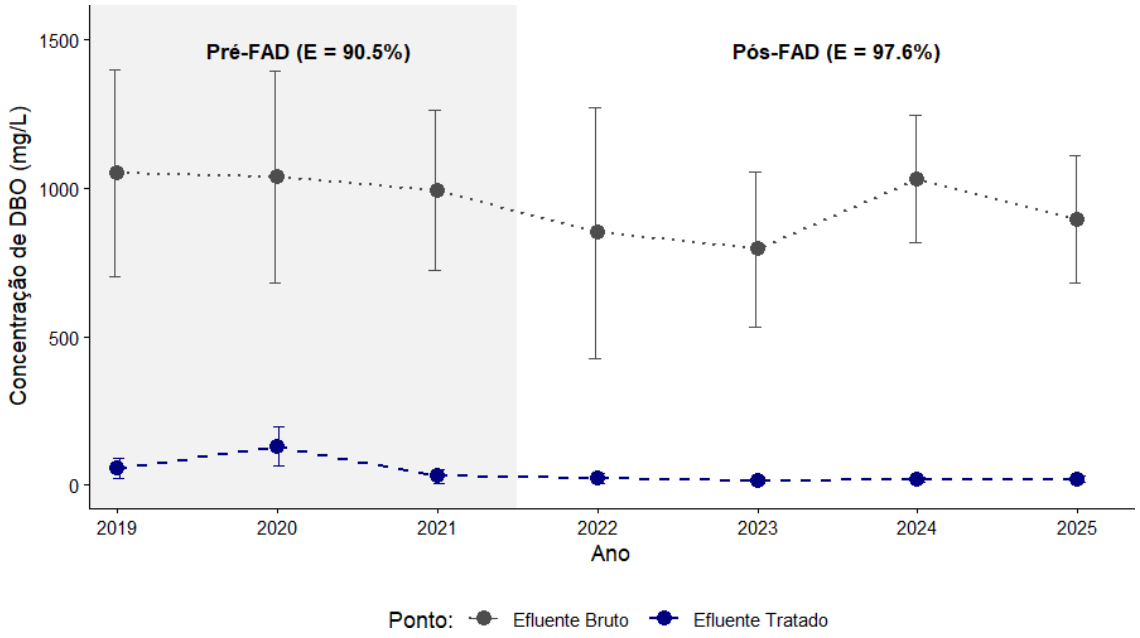
			Concentração (mg/L)				Eficiência de remoção (%)		
Parâmetro	**Período**	**Tipo de efluente**	**Média ± DP**	**Shapiro-Wilk (p-valor)**	**Mediana**	**Teste Hipótese (p-valor)**	**Média ± DP**	**Shapiro-Wilk (p-valor)**	**Teste Hipótese (p-valor)**
Sulfetos (SUF)	Pré-FAD	águas residuárias	0,5 ± 0,6	-	0,3	-	42,9 ± 27,5**B**	0,692	0,01153
		tratado	0,5 ± 0,4	0,0186	0,4**A**	5,42e-07			
	Pós-FAD	águas residuárias	0,5 ± 0,8	-	0,3	-	64,2 ± 29,9**A**	0,0000144	
		tratado	0,1 ± 0,0	5,00e-07	0,1**B**	-			
pH	Pré-FAD	águas residuárias	7,1 ± 0,4	-	7,3	-	-	-	-
		tratado	7,3 ± 0,5	8,10e-08	7,3**A**	3,09e-09			
	Pós-FAD	águas residuárias	7,1 ± 0,4	-	7,1	-	-	-	
		tratado	6,5 ± 0,6	0,0763	6,5**B**	-			

Legenda: Médias de concentração (quando paramétricas) seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste t de Student. Medianas das concentrações e médias de eficiência (E%) seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney. Todos os testes foram aplicados a 5% de probabilidade. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves, 2026

Para a DBO, a implementação da unidade FAD promoveu uma redução estatisticamente significativa na concentração do efluente tratado (p=9,826×10^{-10}), com a média declinando de 93,3 mg/L para 21,2 mg/L, e a mediana regredindo de 61,5 mg/L para 17,7 mg/L. No que tange à performance global, a eficiência média de remoção apresentou um ganho estatístico real (p=9,16×10^{-9}), saltando de 90,5%, no período Pré-FAD, para 97,6% no Pós-FAD. Este desempenho é corroborado pelos achados de Del Nery *et al.* (2016), que, ao avaliarem um arranjo tecnológico similar em abatedouro avícola (integrando FAD como polimento terciário), obtiveram eficiências de 98,6% para DBO, com o efluente final atingindo concentrações próximas a 28 mg/L. Além disso, PAPP (2017) destaca que a tecnologia FAD é essencial para remover a concentração orgânica residual e as frações biodegradáveis particuladas que permanecem em suspensão após o tratamento biológico secundário.

Além da melhora nos índices, observou-se uma redução no desvio padrão (de 6,7% para 1,7%) na eficiência de remoção, o que evidencia maior estabilidade operacional do sistema após 2021. O comportamento das concentrações médias de DBO ao longo do período monitorado (2019–2025) pode ser visualizado no Gráfico 1.

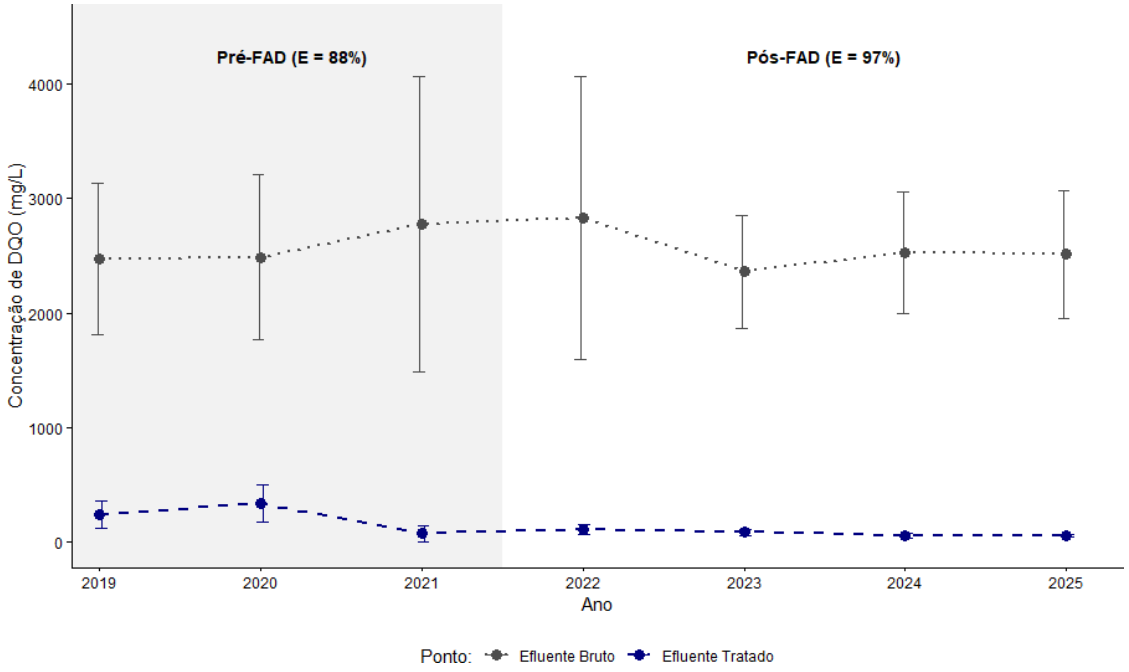
Gráfico 1 – Concentração de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas



Legenda: A região sombreada em cinza-claro delimita o intervalo operacional anterior à implementação do sistema FAD, enquanto a região em branco corresponde ao período posterior à sua instalação (Pós-FAD). Os círculos cinza e azuis representam as médias aritméticas anuais, acompanhados por barras de erro que indicam o desvio padrão (DP) das observações. As linhas pontilhadas (cinza) e tracejada (azul) conectam os valores médios das águas residuárias e tratado de forma ilustrativa, respectivamente. E: eficiência média (%) de remoção de DBO calculada para cada período operacional. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

Em relação à DQO, observou-se comportamento similar, com diferença estatística significativa entre os períodos tanto para as concentrações quanto para as eficiências. A concentração média no ET apresentou queda de 287,3 mg/L para 75,7 mg/L, enquanto a mediana reduziu de 248,6 mg/L para 63,2 mg/L (p=8,361×10^{-11}). Paralelamente, a eficiência média de remoção de DQO foi elevada de 88,0% para 97,0% (p=3,60×10^{-11}). Este resultado supera as eficiências relatadas por Bocchi (2022), que obteve remoções superiores a 78% na associação de tecnologias físico-químicas em efluentes de suínos. A manutenção de valores de DQO consistentemente superiores à DBO (na razão de 2 a 3 vezes), em ambos os períodos, confirma a presença de matéria orgânica recalcitrante ou de difícil biodegradabilidade, característica intrínseca de efluentes agroindustriais complexos que contêm resíduos de sangue, gorduras e proteínas (Pereira; Hoffmann, 2024). As variações nas concentrações médias de DQO entre os regimes Pré e Pós-FAD estão detalhadas no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Concentração de demanda química de oxigênio (DQO) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas

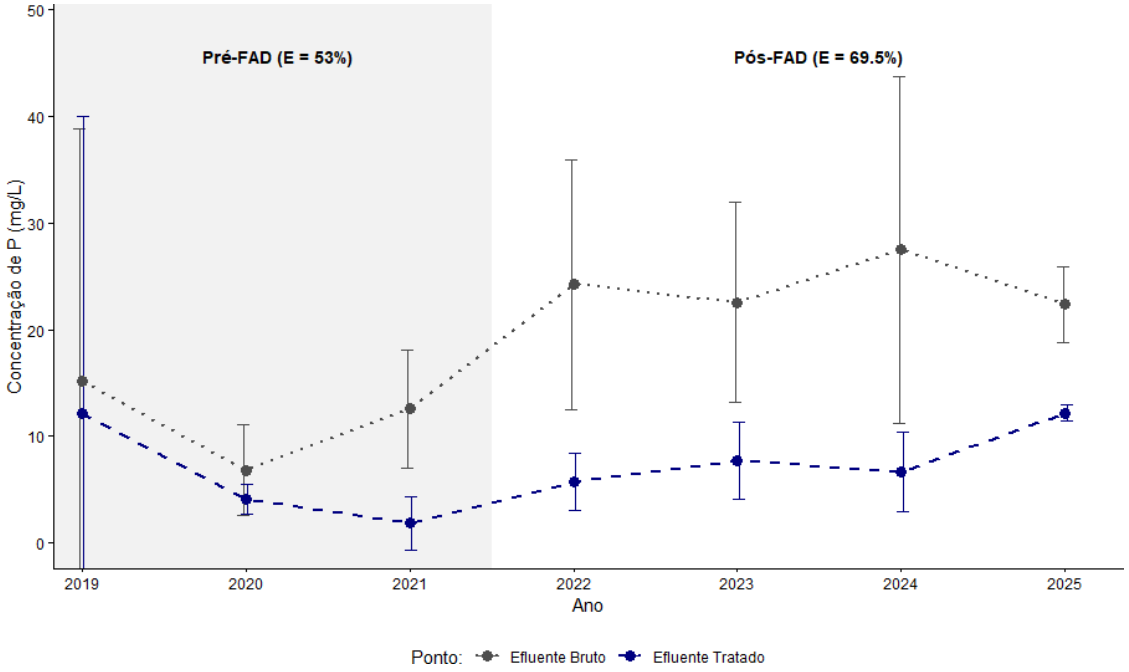


Legenda: A região sombreada em cinza-claro delimita o intervalo operacional anterior à implementação do sistema FAD, enquanto a região em branco corresponde ao período posterior à sua instalação (Pós-FAD). Os círculos cinza e azuis representam as médias aritméticas anuais, acompanhados por barras de erro que indicam o desvio padrão (DP) das observações. As linhas pontilhadas (cinza) e tracejada (azul) conectam os valores médios das águas residuárias e tratado de forma ilustrativa, respectivamente. E: eficiência média (%) de remoção de DQO calculada para cada período operacional. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

Para o Fósforo total (P), embora não tenha sido registrada diferença estatística na concentração final do efluente tratado (p=0,05699), este resultado demonstra a resiliência

operacional da unidade FAD. Observou-se que o sistema foi capaz de manter o padrão de descarte estável mesmo diante de um incremento de 100% na concentração de fósforo nas águas residuárias, que saltou de 11,0 mg/L para 22,0 mg/L entre os períodos. Como consequência direta dessa manutenção da qualidade de saída frente ao dobro da concentração de entrada, houve um ganho estatisticamente significativo na eficiência de remoção, que se elevou de 53,0% para 69,5% (p=0,00892). O comportamento das concentrações médias de P ao longo do monitoramento (2019–2025), evidenciando essa estabilidade no descarte, pode ser visualizado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Concentração de fósforo total (P) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas



Legenda: A região sombreada em cinza-claro delimita o intervalo operacional anterior à implementação do sistema FAD, enquanto a região em branco corresponde ao período posterior à sua instalação (Pós-FAD). Os círculos cinza e azuis representam as médias aritméticas anuais, acompanhados por barras de erro que indicam o desvio padrão (DP) das observações. As linhas pontilhadas (cinza) e tracejada (azul) conectam os valores médios das águas residuárias e tratado de forma ilustrativa, respectivamente. E: eficiência média (%) de remoção de P calculada para cada período operacional. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

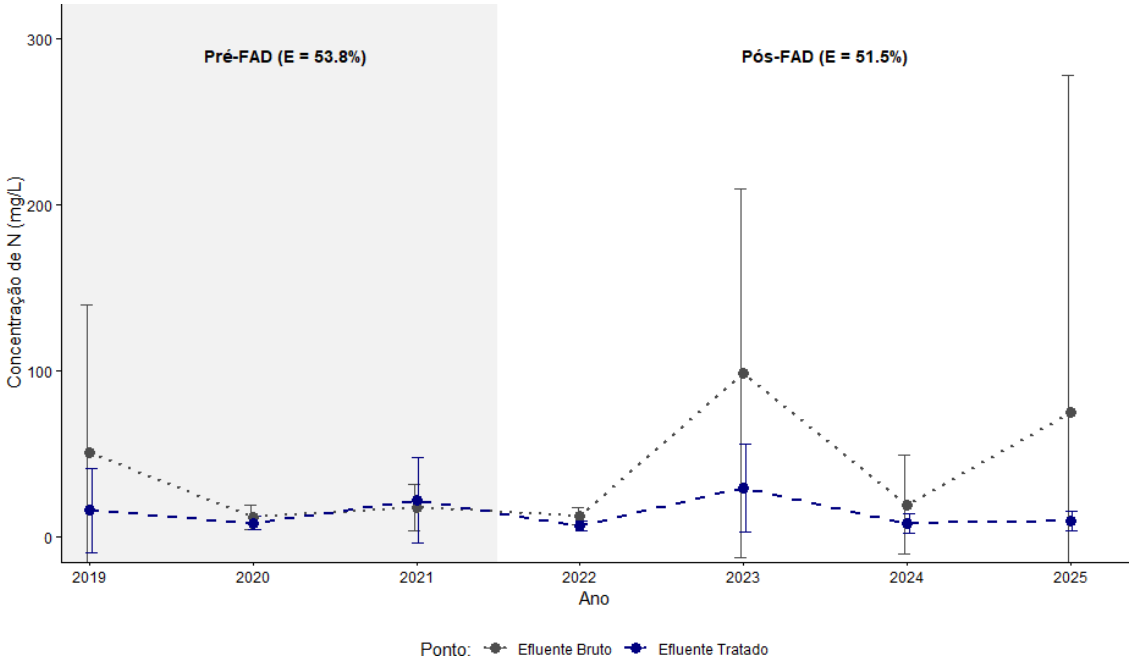
Tecnicamente, esse desempenho superior justifica-se pela introdução da coagulação química associada à flotação. Diferentemente das lagoas biológicas, onde a remoção de fósforo é frequentemente limitada por depender essencialmente da absorção celular pela biomassa, a unidade FAD remove o nutriente através da precipitação química com sais metálicos (AISSE; Reali, 2001; Penetra, 2003). No sistema avaliado, utilizou-se o policloreto de alumínio (PAC) como coagulante, complementado pela adição de polímero aniônico para favorecer a formação de flocos mais densos e resistentes (Lucas, 2019; Corso; Papp; Mees, 2019).

Segundo Aisse e Reali (2001) e Penetra (2003), a dosagem desses reagentes converte o fosfato solúvel em precipitados particulados insolúveis, como o fosfato de alumínio ($AlPO_4$) ou complexos de hidróxido de alumínio que adsorvem o fósforo. No modelo GFAD 350, operado na ETE, o uso de chicanas internas intensifica as reações físico-químicas e estabiliza esses flocos, permitindo que sejam eficientemente arrastados para a superfície pelas microbolhas (40 a 70 μm) geradas pelo sistema de saturação de ar (Aisse; Reali, 2001; Penetra, 2003).

Apesar dessa eficácia, os dados revelaram uma alta variabilidade (elevado desvio padrão) e a persistência de picos residuais, o que indica que o fósforo não chega à ETE de forma constante, mas sim por meio de aportes episódicos. Na agroindústria avícola, essas oscilações bruscas e a presença de *outliers* estão diretamente associadas às operações de higienização das instalações. O uso intensivo de detergentes industriais e desinfetantes, que frequentemente contêm aditivos fosfatados, para a remoção de gorduras, gera choques de concentração pontuais no sistema de tratamento. Assim, embora os resultados sejam comparáveis aos de sistemas de alto desempenho descritos por Del Nery *et al.* (2016), a "montanha-russa" observada nos dados reflete o impacto da variabilidade de carga proveniente dos resíduos de limpeza da fábrica.

No que tange ao Nitrogênio amoniacal total (N), os resultados indicaram que o parâmetro não sofreu alterações com a mudança do regime operacional, mantendo concentrações ($p=0,9639$) e eficiências de remoção ($p=0,7939$) estatisticamente equivalentes entre os períodos. As medianas de saída permaneceram estáveis, situando-se entre 8,1 mg/L e 8,8 mg/L, enquanto a eficiência média de remoção apresentou oscilação irrelevante de 53,8% para 51,5%. O comportamento das concentrações médias de N durante o período avaliado está detalhado no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Concentração de nitrogênio amoniacal (N) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas



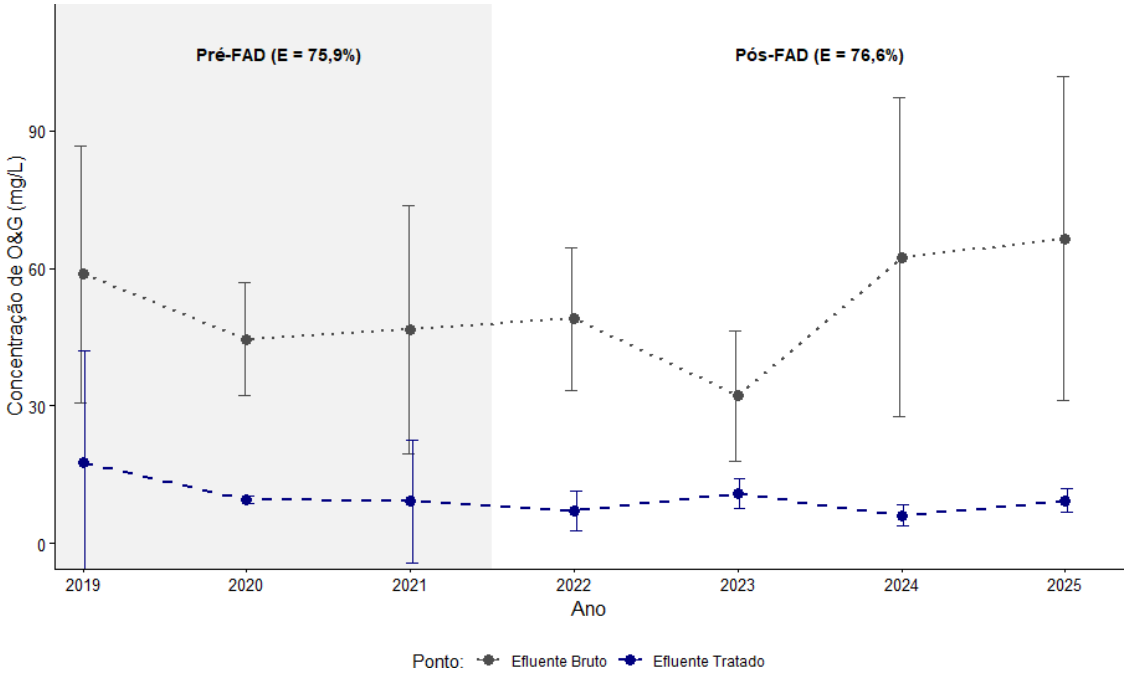
Legenda: A região sombreada em cinza-claro delimita o intervalo operacional anterior à implementação do sistema FAD, enquanto a região em branco corresponde ao período posterior à sua instalação (Pós-FAD). Os círculos cinza e azuis representam as médias aritméticas anuais, acompanhados por barras de erro que indicam o desvio padrão (DP) das observações. As linhas pontilhadas (cinza) e tracejada (azul) conectam os valores médios das águas residuárias e tratado de forma ilustrativa, respectivamente. E: eficiência média (%) de remoção de N calculada para cada período operacional. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

Apesar da estabilidade das medianas, a série histórica revelou um comportamento descontínuo, marcado por picos abruptos de concentração, especialmente em 2023 e 2025. Esse padrão 'ruidoso' é corroborado por Yaakob *et al.* (2018) e Rodrigues *et al.* (2016), que descrevem a elevada variabilidade e a natureza heterogênea da água residuária de abatedouros, onde a alternância de etapas produtivas intermitentes, as operações de higienização e as variações no volume de abate diário impedem uma tendência direcional clara e estável no monitoramento.

Essa estabilidade estatística reflete a seletividade da tecnologia, visto que o processo FAD não é a ferramenta precípua para a remoção de nitrogênio (Penetra, 2003). A análise em questão representa a soma das espécies de amônia livre (NH3) e íon amônio (NH_4+), que são majoritariamente solúveis no efluente. Diferentemente do fósforo, essas formas nitrogenadas não se tornam insolúveis com a adição de coagulantes metálicos (como o PAC), permanecendo na fase líquida após o processo físico de flotação. Portanto, a unidade FAD atua apenas no polimento indireto de frações particuladas ou adsorvidas aos sólidos (Lucas, 2019; Nardi *et al.*, 2008), enquanto a efetiva redução da carga dissolvida permanece dependente da nitrificação biológica ocorrida nas lagoas precedentes (Andrade Junior, 2017; Teixeira, 2006).

Para os O&G, a implementação do sistema de flotação promoveu uma redução na concentração do efluente tratado (p=0,001184), com a média declinando de 13,5 mg/L para 8,4 mg/L. Embora as medianas em ambos os períodos tenham permanecido no limite de detecção do método (9,2 mg/L), devido à elevada frequência de dados censurados, o teste de Wilcoxon-Mann-Whitney detectou a diferença estatística em função da mudança na distribuição dos postos e, sobretudo, da eliminação de picos extremos no período Pós-FAD. Esse ganho na estabilidade operacional é corroborado pela expressiva redução do desvio padrão, que regrediu de 17,5 mg/L para 6,7 mg/L, refletindo uma maior previsibilidade do tratamento. O comportamento das concentrações médias de O&G ao longo dos anos avaliados (2019–2025) pode ser visualizado no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Concentração de óleos e graxas (O&G) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas



Legenda: A região sombreada em cinza-claro delimita o intervalo operacional anterior à implementação do sistema FAD, enquanto a região em branco corresponde ao período posterior à sua instalação (Pós-FAD). Os círculos cinza e azuis representam as médias aritméticas anuais, acompanhados por barras de erro que indicam o desvio padrão (DP) das observações. As linhas pontilhadas (cinza) e tracejada (azul) conectam os valores médios das águas residuárias e tratado de forma ilustrativa, respectivamente. E: eficiência média (%) de remoção de O&G calculada para cada período operacional. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

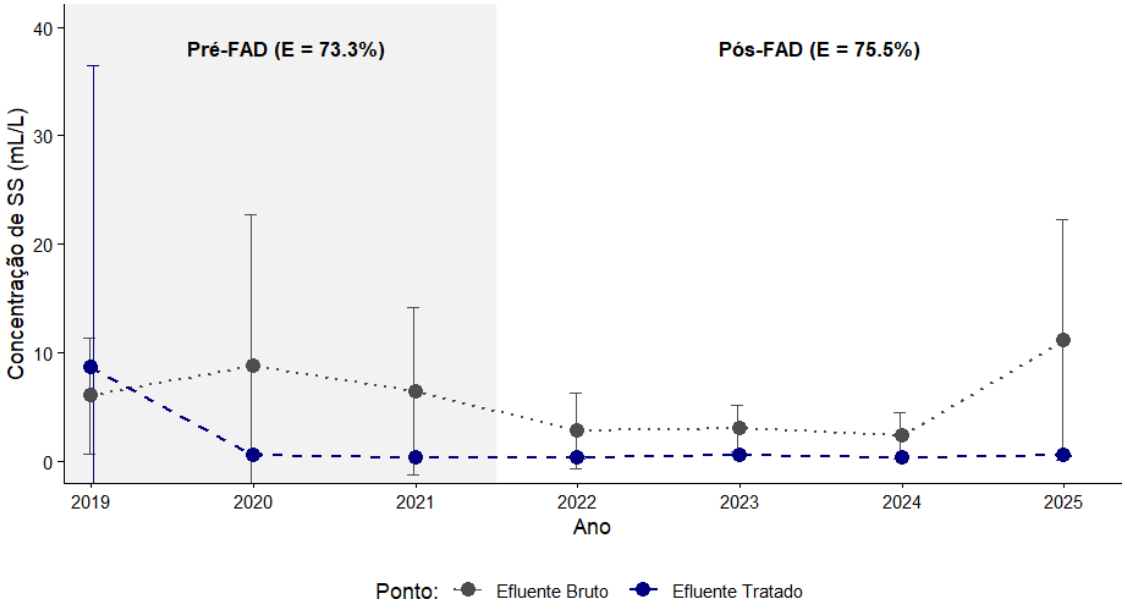
No que tange à performance global, a eficiência média de remoção de O&G não apresentou diferença estatisticamente significativa entre os regimes operacionais (p=0,08106), situando-se em 75,9% no período Pré-FAD, e 76,6%, no Pós-FAD. Apesar da ausência de ganho percentual estatístico, os resultados indicam que o sistema de flotação manteve uma capacidade de remoção constante e mais estável do que o sistema de decantação anterior.

A justificativa para esse desempenho reside na especificidade da tecnologia FAD para a remoção de substâncias hidrofóbicas. Diferentemente da sedimentação convencional, o processo é altamente eficaz na separação de frações lipídicas emulsificadas. Segundo Metcalf e Eddy (2016) e Nunes (2012), o condicionamento químico prévio é essencial nesse cenário para desestabilizar as emulsões, permitindo que os agregados gordurosos sejam capturados e transportados para a superfície para remoção mecânica por raspagem.

O desempenho observado é consistente com os achados de Schoenhals (2006) em frigoríficos avícolas e bovinos que validam o arranjo físico-químico como a solução tecnológica mais robusta para a gestão de efluentes com elevada concentração lipídica.

Os sólidos suspensos (SS) representam a fração de partículas presentes no efluente que possuem densidade e peso específicos suficientes para se separarem da fase líquida e se depositarem no fundo dos tanques através da ação da gravidade. Neste estudo, observou-se uma redução na concentração de SS no ET ($p=1{,}21\times10^{-8}$), com a média declinando de 4,4 mg/L, no período Pré-FAD, para 0,4 mg/L no regime Pós-FAD. No entanto, essa queda no teor residual foi acompanhada por uma menor concentração de SS também no AR durante o segundo período avaliado. O comportamento das concentrações médias de SS ao longo dos anos (2019–2025) pode ser visualizado no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Concentração de sólidos suspensos (SS) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas

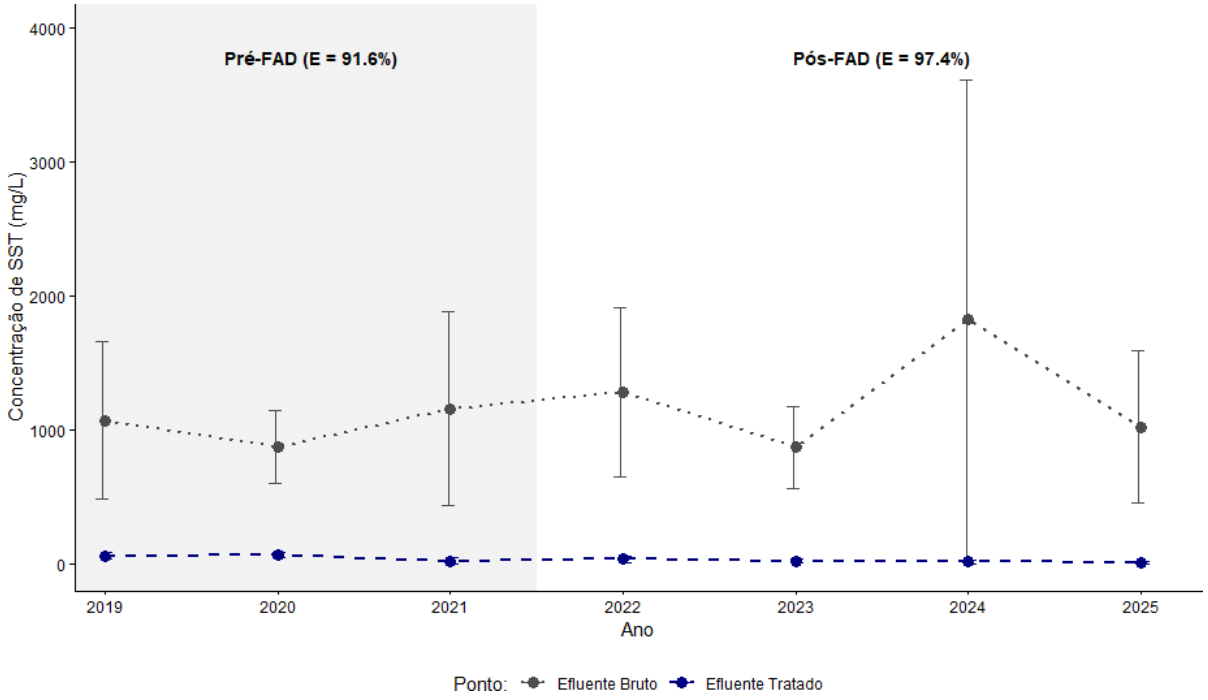


Legenda: A região sombreada em cinza-claro delimita o intervalo operacional anterior à implementação do sistema FAD, enquanto a região em branco corresponde ao período posterior à sua instalação (Pós-FAD). Os círculos cinza e azuis representam as médias aritméticas anuais, acompanhados por barras de erro que indicam o desvio padrão (DP) das observações. As linhas pontilhadas (cinza) e tracejada (azul) conectam os valores médios das águas residuárias e tratado de forma ilustrativa, respectivamente. E: eficiência média (%) de remoção de SS calculada para cada período operacional. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

No que tange à performance global, a eficiência média de remoção de SS não apresentou diferença estatística significativa entre os períodos (p=0,8202), mantendo-se em patamares similares de 73,3% e 75,5%. Este resultado reflete o fato de o AR já apresentar uma concentração sedimentável reduzida, o que limitou ganhos percentuais adicionais na etapa terciária de polimento.

Os sólidos suspensos totais (SST) representam a totalidade das partículas sólidas que permanecem em suspensão no efluente, não se depositando naturalmente por gravidade. A implementação do sistema FAD promoveu uma redução das concentrações de SST, com a média baixando de 66,6 mg/L para 23,1 mg/L ($p=3,93\times10^{-10}$). A mediana regrediu de 62,8 mg/L para 18,0 mg/L, evidenciando uma clarificação mais eficaz do efluente final. As variações nas concentrações médias de SST ao longo do monitoramento estão detalhadas no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Concentração de sólidos suspensos totais (SST) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas



Legenda: A região sombreada em cinza-claro delimita o intervalo operacional anterior à implementação do sistema FAD, enquanto a região em branco corresponde ao período posterior à sua instalação (Pós-FAD). Os círculos cinza e azuis representam as médias aritméticas anuais, acompanhados por barras de erro que indicam o desvio padrão (DP) das observações. As linhas pontilhadas (cinza) e tracejada (azul) conectam os valores médios das águas residuárias e tratado de forma ilustrativa, respectivamente. E: eficiência média (%) de remoção de SST calculada para cada período operacional. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

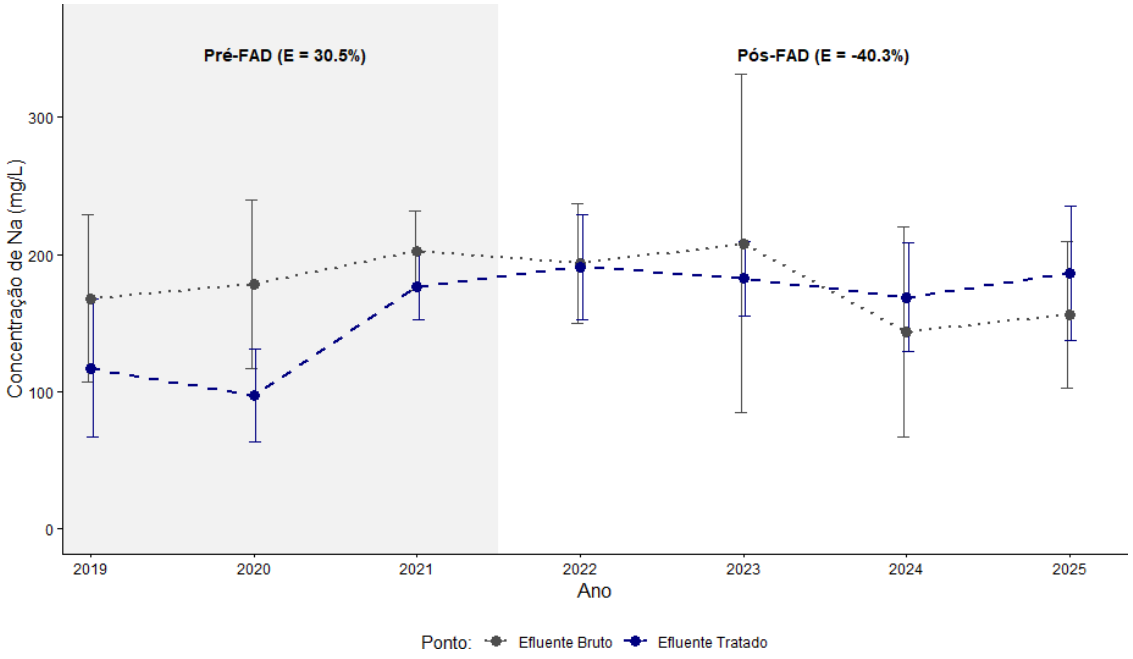
Paralelamente, houve um ganho estatisticamente significativo na eficiência de remoção de SST, que saltou de 91,6%, no período Pré-FAD, para 97,4% no Pós-FAD

($p=4{,}33\times10^{-9}$). Este incremento demonstra a superioridade da tecnologia de flotação no tratamento de sólidos coloidais e suspensos em comparação ao sistema de decantação convencional utilizado anteriormente.

Este desempenho superior é fundamentado pelo princípio físico-químico da tecnologia FAD, que combina o condicionamento químico à separação física. A ação dos coagulantes e polímeros desestabiliza as cargas das partículas coloidais e matéria orgânica, promovendo sua aglomeração em flocos maiores e mais estáveis (Metcalf; Eddy, 2016). Enquanto a sedimentação convencional depende exclusivamente da gravidade para separar partículas mais densas que a água, a flotação utiliza a injeção de microbolhas (40 a 70 µm) que aderem a esses flocos formados, reduzindo drasticamente a densidade do agregado 'floco-bolha' e provocando sua ascensão à superfície para remoção mecânica. Essa mecânica permite remover partículas leves e pequenas de forma muito mais ágil e completa que a decantação, o que explica a redução acentuada dos valores residuais de sólidos no período Pós-FAD (Metcalf; Eddy, 2016).

Para o Sódio Na, observou-se um incremento significativo nas concentrações de saída ($p=1{,}18\times10^{-8}$), com a média saltando de 107,2 mg/L, no período Pré-FAD, para 180,6 mg/L no regime Pós-FAD. O comportamento das concentrações médias de Na ao longo dos anos avaliados (2019 – 2025) pode ser visualizado no Gráfico 8.

Gráfico 8 – Concentração de sódio (Na) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas



Legenda: A região sombreada em cinza-claro delimita o intervalo operacional anterior à implementação do sistema FAD, enquanto a região em branco corresponde ao período posterior à sua instalação (Pós-FAD). Os círculos cinza e azuis representam as médias aritméticas anuais, acompanhados por barras de erro que indicam o desvio padrão

(DP) das observações. As linhas pontilhadas (cinza) e tracejada (azul) conectam os valores médios das águas residuárias e tratado de forma ilustrativa, respectivamente. E: eficiência média (%) de remoção de Na calculada para cada período operacional. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

No que tange à performance global, a eficiência de remoção de Na apresentou diferença estatística significativa entre os períodos (p=0,0000421), transitando de uma média positiva de 30,5%, no regime Pré-FAD, para uma eficiência negativa de -40,3% no período Pós-FAD.

O sódio, em abatedouros avícolas, provém majoritariamente do uso contínuo de detergentes e produtos de higienização (Aziz *et al.*, 2018; Ng *et al.*, 2022). Segundo os autores, esses parâmetros oscilam em função do controle de insumos e variações no regime de abate, o que explica a distribuição não normal e os episódios de salinização atípica observados na série histórica.

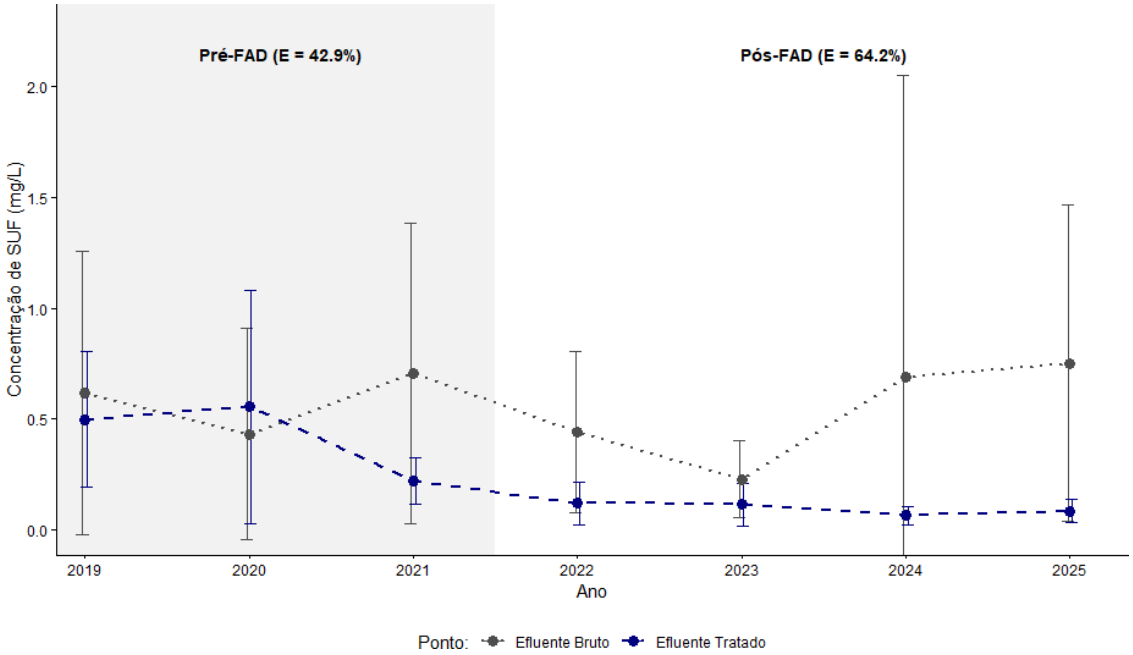
Tecnicamente, o sistema FAD é projetado para a separação eficiente de material particulado e frações lipídicas, possuindo baixa eficiência na remoção de sólidos dissolvidos (íons) (Penetra, 2003). Assim, o íon *Na+* permanece na fase líquida e é transportado até o descarte final. Adicionalmente, o condicionamento químico intensificou esse acúmulo: o uso de coagulantes como o PAC consome a alcalinidade do meio, o que resultou na trajetória de acidificação consolidada na unidade 4FT (mediana de 5,5). Para garantir a conformidade legal e o controle de corrosão, sistemas industriais exigem a adição de agentes alcalinizantes sódicos (NaOH ou Na_2CO_3), os quais elevam diretamente a concentração de sódio no efluente final por não serem retidos no processo físico de flotação.

Por fim, a persistência de concentrações elevadas e a variabilidade observada na série histórica (CV elevado e p-valor de 0,031 no teste de Shapiro-Wilk) reforçam a necessidade de estratégias de equalização de concentração e foco na otimização das etapas de tratamento anteriores ao FAD. O monitoramento sistemático é essencial, uma vez que episódios de sobreconcentração salina podem ser prejudiciais à biomassa sensível dos reatores biológicos precedentes, inibindo o metabolismo microbiano e comprometendo a eficiência global do tratamento (Marinho, 2017; Lucas, 2019).

Para os SUF, a implementação da unidade FAD promoveu uma redução estatisticamente significativa na concentração do efluente tratado (p=5,42×10⁻⁷), com a média declinando de 0,5 mg/L, no período Pré-FAD, para 0,1 mg/L no regime Pós-FAD. A mediana também apresentou redução, regredindo de 0,4 mg/L para 0,1 mg/L, indicando um polimento mais eficaz de compostos reduzidos de enxofre no sistema atual. O comportamento das

concentrações médias de SUF ao longo dos anos avaliados (2019–2025) pode ser acompanhado no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Concentração de sulfetos (SUF) nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas

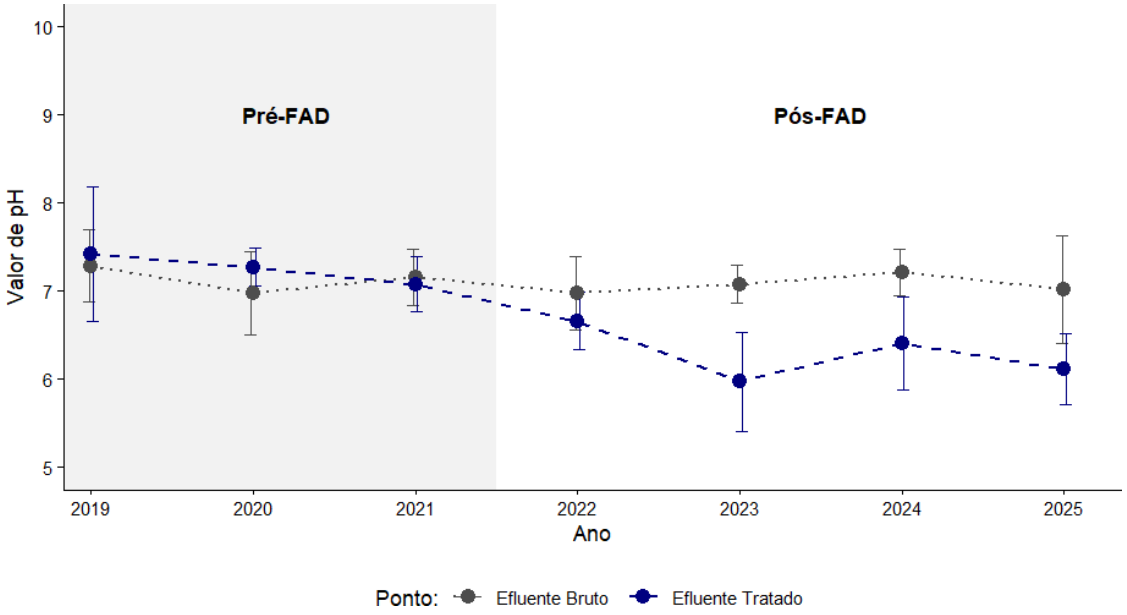


Legenda: A região sombreada em cinza-claro delimita o intervalo operacional anterior à implementação do sistema FAD, enquanto a região em branco corresponde ao período posterior à sua instalação (Pós-FAD). Os círculos cinza e azuis representam as médias aritméticas anuais, acompanhados por barras de erro que indicam o desvio padrão (DP) das observações. As linhas pontilhadas (cinza) e tracejada (azul) conectam os valores médios das águas residuárias e tratado de forma ilustrativa, respectivamente. E: eficiência média (%) de remoção de SUF calculada para cada período operacional. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

No que tange à performance global, houve um ganho estatisticamente significativo na eficiência média de remoção de sulfetos (p=0,01153), que saltou de 42,9%, no período Pré-FAD, para 64,2% no Pós-FAD. Esse incremento demonstra que a configuração operacional com flotação é mais capaz de oxidar ou precipitar a concentração de sulfetos provenientes das etapas anaeróbias do que o sistema anterior (Aisse; Reali, 2001).

Em relação ao pH, observou-se uma diferença estatística significativa entre os períodos avaliados ($p=3{,}09\times10^{-9}$), com a mediana do efluente tratado sofrendo um deslocamento de 7,3, no regime Pré-FAD, para 6,5 no Pós-FAD. Esse resultado indica uma nítida tendência à acidificação do descarte final, fenômeno associado ao condicionamento químico necessário ao processo de flotação, no qual a adição de coagulantes consome a alcalinidade do meio. As variações de pH no efluente ao longo dos anos podem ser visualizadas no Gráfico 10.

Gráfico 10 – Variação de pH nas unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas



Legenda: A região sombreada em cinza-claro delimita o intervalo operacional anterior à implementação do sistema FAD, enquanto a região em branco corresponde ao período posterior à sua instalação (Pós-FAD). Os círculos cinza e azuis representam as médias aritméticas anuais, acompanhados por barras de erro que indicam o desvio padrão (DP) das observações. As linhas pontilhadas (cinza) e tracejada (azul) conectam os valores médios das águas residuárias e tratado de forma ilustrativa, respectivamente. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

Para a compreensão do comportamento do sistema, as variáveis ambientais e operacionais - temperatura da amostra, do ar e vazão - foram monitoradas para caracterizar o cenário de operação nos regimes Pré-FAD e Pós-FAD. As médias, desvio padrão, medianas e valores máximos e mínimos estão descritos na Tabela 11.

Tabela 11 – Comportamento da temperatura da amostra, ar e vazão nos períodos Pré-FAD e Pós-FAD.

Variável	Período	Efluente	Média ± DP	Mediana	Min	Max
Temperatura da amostra (°C)	Pré-FAD	Bruto	27,5 ± 5,0	27,5	11,2	33,9
		Tratado	29,0 ± 14,4	26,4	11,9	93,1
	Pós-FAD	Bruto	29,4 ± 3,7	30,1	21,9	37,1
		Tratado	26,9 ± 3,7	27,1	16,7	35
Temperatura do ar (°C)	Pré-FAD	Bruto	25,7 ± 4,34	25,9	13,3	34,5
		Tratado	28,5 ± 14,5	25,9	13,3	93
	Pós-FAD	Bruto	28,3 ± 3,3	28,7	21,0	36,1
		Tratado	28,0 ± 3,6	28,5	21,0	36,2
Vazão (L/s)	Pré-FAD	Bruto	33,2 ± 26,8	32,4	0,0	130
		Tratado	33,0 ± 26,6	32,4	0,1	130
	Pós-FAD	Bruto	33,2± 9,3	45	43	86
		Tratado	48,0 ± 9,3	45	43	86

Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

A análise da Tabela 11 revela que a implementação da unidade de flotação foi acompanhada por um incremento real na vazão média (V), que saltou de 33,2 L/s, no período Pré-FAD, para 48,0 L/s no período Pós-FAD. Mais relevante que o aumento volumétrico foi a estabilização do regime hidráulico, evidenciada pela redução do desvio padrão de 26,8 L/s para apenas 9,3 L/s. Este cenário demonstra que o sistema FAD foi capaz de entregar eficiências superiores de polimento mesmo operando sob uma concentração hidráulica 44% maior e substancialmente mais constante.

No que tange ao perfil térmico, as médias da temperatura e do ar mantiveram-se em faixas mesofílicas favoráveis (entre 26,8 °C e 29,4 °C), assegurando que o metabolismo microbiológico nas lagoas biológicas precedentes ocorresse em condições ideais. Por fim, a nítida redução da variabilidade operacional no período Pós-FAD, com a eliminação de valores extremos (*outliers*) de temperatura e vazão que caracterizavam a instabilidade do regime anterior, confirma o aprimoramento da previsibilidade e do controle global do tratamento.

5.3 Análises de eficiência por unidade operacional: efeito das etapas do tratamento

A Tabela 12 sumariza os parâmetros estatísticos que descrevem o comportamento dos efluentes ao longo do processo de tratamento. O teste de Shapiro-Wilk confirmou que todas as variáveis, em todas as etapas do tratamento, violaram os pressupostos de normalidade ($p < 0,05$), exceto o pH na etapa AR.

Tabela 12 - Média, desvio-padrão e mediana da concentração de DBO, N, SST e pH, em função das diferentes etapas do sistema de tratamento de efluentes (continua)

Variável	Tratamento	Média ± DP	Shapiro-wilk (p-valor)	Mediana	Kruskal-Wallis (p-valor)
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	AR	1849,7 ± 968,0	2,56e-09	1552,0a	4,81e-32
	1LA	1464,6 ± 862,1	4,21e-07	1370,0ab	
	2LA	1376,3 ± 865,0	6,54e-08	1363,0b	
	3LA	1359,7 ± 820,1	6,56e-06	1320,0b	
	4FT	1361,3 ± 884,3	8,47e-08	1304,0b	
	5ET	22,8 ± 13,2	0,00222	23,6c	
Nitrogênio amoniacal (N)	AR	12,8 ± 14,1	1,07e-15	8,4d	5,41e-86
	1LA	23,0 ± 23,0	3,44e-14	14,6b	
	2LA	58,1 ± 23,5	1,18e- 5	56,6c	
	3LA	33,7 ± 39,1	4,07e-16	19,6c	
	4FT	29,1 ± 33,5	2,17e-16	20,7c	
	5ET	8,3 ± 9,8	1,36e-16	5,0a	
	3LA	959,4 ± 519,0	0	1012a	1,77e-61
	4FT	1087,3 ± 505,3	0	1210a	

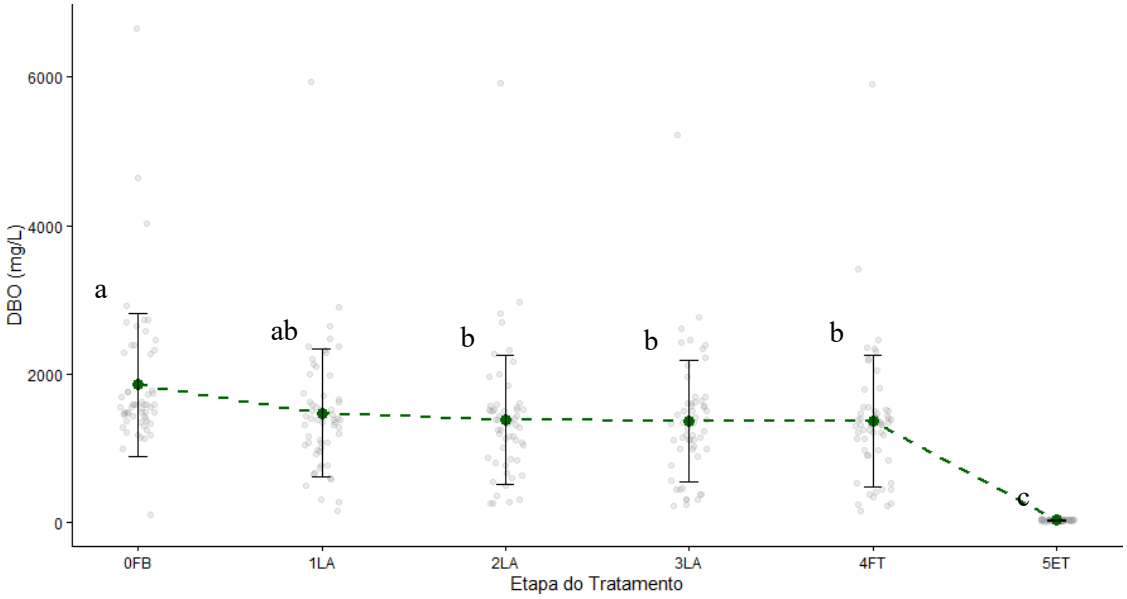
Variável	Tratamento	Média ± DP	Shapiro-wilk (p-valor)	Mediana	Kruskal-Wallis (p-valor)
Sólidos suspensos totais (SST)	5ET	13,9 ± 16,8	0	9b	
Potencial hidrogeniônico (pH)	AR	7,2 ± 0,3	0,0865	7,2a	1,11e-236
	1LA	6,6 ± 0,3	0	6,6b	
	2LA	6,4 ± 0,2	0	6,4c	
	3LA	6,8 ± 0,5	0	6,9 d	
	4FT	5,6 ± 0,7	0,0129	5,5e	
	5ET	5,7 ± 0,7	0,0114	5,7e	

Medianas seguidas por letras minúsculas iguais não se diferem estatisticamente pelo teste Dunn a 5% de probabilidade.

Legenda: AR: águas residuárias, 1LA: primário, 2LA: anaeróbico, 3LA: aeróbico, 4FT: FAD e 5ET: tratado. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves, 2026.

Os resultados do monitoramento de DBO nas unidades operacionais revelam que a eficiência do sistema não é distribuída uniformemente ao longo das etapas (Gráfico 11).

Gráfico 11 - Comportamento da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) nas diferentes unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas



Legenda: Os círculos verdes representam as médias aritméticas, acompanhadas por barras de erro indicando o desvio padrão. Os pontos cinzas representam as observações individuais. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística significativa entre as etapas pelo teste de Dunn ($p < 0,05$). A linha pontilhada no gráfico é meramente ilustrativa FB: águas residuárias; 1LA: tratamento primário; 2LA: reator anaeróbio; 3LA: reator aeróbio 1; 4FT: do sistema de flotação; 5ET: efluente tratado pós-FAD. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

Foi observada a existência do “desempenho biológico em níveis insatisfatórios" entre o reator anaeróbio (2LA) e o do flotador (4FT), em que as medianas de DBO permaneceram estatisticamente similares ($p>0,05$), situando-se em patamares elevados de 1.304 mg/L a 1.363

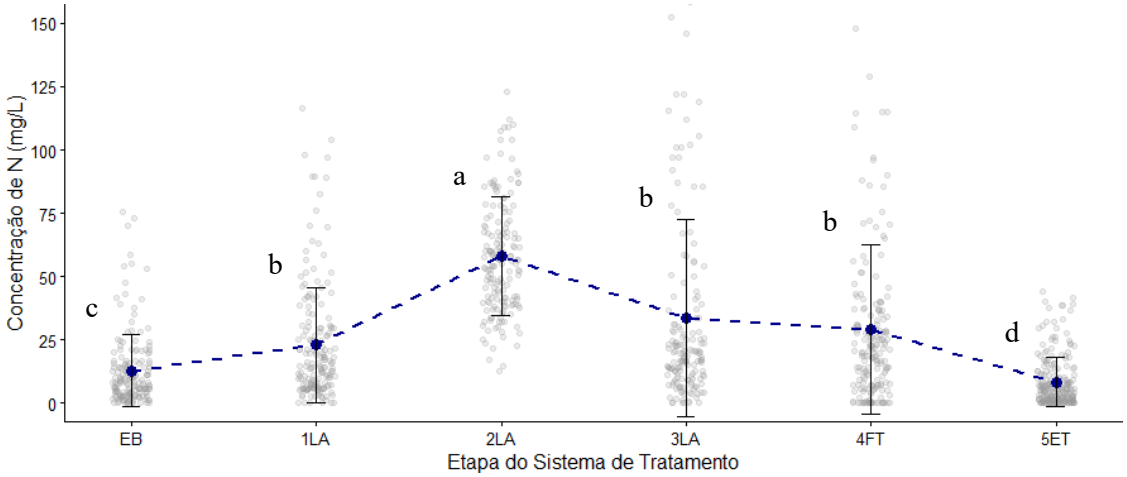
mg/L. Nesse trecho, as eficiências parciais de remoção foram de apenas 20% a 26%, valores que divergem dos padrões esperados para o tratamento de efluentes avícolas. Segundo Jordão e Pessoa (2017) e Silva, Von Sperling e Oliveira-Filho (2007), o desempenho típico para lagoas anaeróbias situa-se entre 50% e 70%, enquanto sistemas aerados deveriam alcançar de 75% a 95% de eficiência na remoção de DBO.

Essa estagnação sugere que os processos biológicos operaram abaixo de seu potencial, o que pode ser atribuído a fatores críticos, como a insuficiência do tempo de detenção hidráulica (TDH) frente à alta concentração de DBO e variações na taxa de aeração. Conforme destacam Burton *et al.* (2013), a manutenção de níveis de oxigênio dissolvido (OD) acima de 2 mg/L é vital para a eficiência aeróbia; valores abaixo deste limite ou variações bruscas de carga inibem o metabolismo da biomassa, resultando em má sedimentação e arraste de sólidos (Burton *et al.*, 2013). Adicionalmente, a presença de óleos e graxas não removidos previamente pode ter dificultado a transferência de oxigênio e inibido a atividade microbiana.

Embora a implementação do FAD tenha elevado a eficiência global do sistema para patamares superiores a 97%, os resultados revelam uma vulnerabilidade estrutural na planta. Atualmente, o flotador assume o papel de pilar principal de remoção, processando uma concentração de DBO (~1.300 L/s) que deveria ter sido previamente degradada nas etapas biológicas. Essa configuração impõe um risco iminente de sobrecarga e falha por saturação da unidade físico-química, uma vez que o FAD deveria atuar estritamente como polimento terciário de frações residuais, e não como redutor primário de carga bruta. Portanto, estes resultados apontam a urgência de otimizar a operação das lagoas para restaurar o equilíbrio da cadeia de tratamento e garantir a sustentabilidade operacional do sistema.

As concentrações de nitrogênio amoniacal total (N) ao longo das etapas de tratamento do sistema estão apresentadas no Gráfico 12, a seguir.

Gráfico 12 - Comportamento do nitrogênio amoniacal total (N) nas diferentes unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas



Legenda: Os círculos azuis representam as médias aritméticas, acompanhadas por barras de erro indicando o desvio padrão. Os pontos cinzas representam as observações individuais. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística significativa entre as etapas pelo teste de Dunn ($p < 0,05$). A linha pontilhada no gráfico é meramente ilustrativa EB: águas residuárias; 1LA: tratamento primário; 2LA: reator anaeróbio; 3LA: reator aeróbio 1; 4FT: do sistema de flotação; 5ET: efluente tratado pós-FAD. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

Observou-se um aumento estatisticamente significativo nas concentrações de N entre o tratamento primário (1LA), com mediana de 14,56 mg/L, e o reator anaeróbio (2LA), onde atingiu o pico de 56,56 mg/L. Esse incremento fundamenta-se na mineralização intensa da matéria orgânica, processo denominado amonificação, no qual bactérias anaeróbias degradam compostos complexos, como proteínas e resíduos de sangue, convertendo o nitrogênio orgânico em formas amoniacais solúveis (Brito; Bastos, 2019; Teixeira, 2006).

A transição do reator 2LA para a lagoa aeróbia (3LA) marca o início da oxidação biológica, resultando em uma queda de 42% na concentração de nitrogênio amoniacal. Este processo, denominado nitrificação, ocorre em duas etapas principais mediadas por bactérias autotróficas: a nitrosação (conversão de amônio em nitrito) e a nitração (oxidação de nitrito a nitrato) (Jordão; Pessoa, 2017; Teixeira, 2006). Entretanto, a similaridade estatística entre as etapas 3LA e as águas residuárias do flotador (4FT) indica uma estabilidade na nitrificação, a qual deve ser analisada sob a ótica da razão C:N (ou DQO:N).

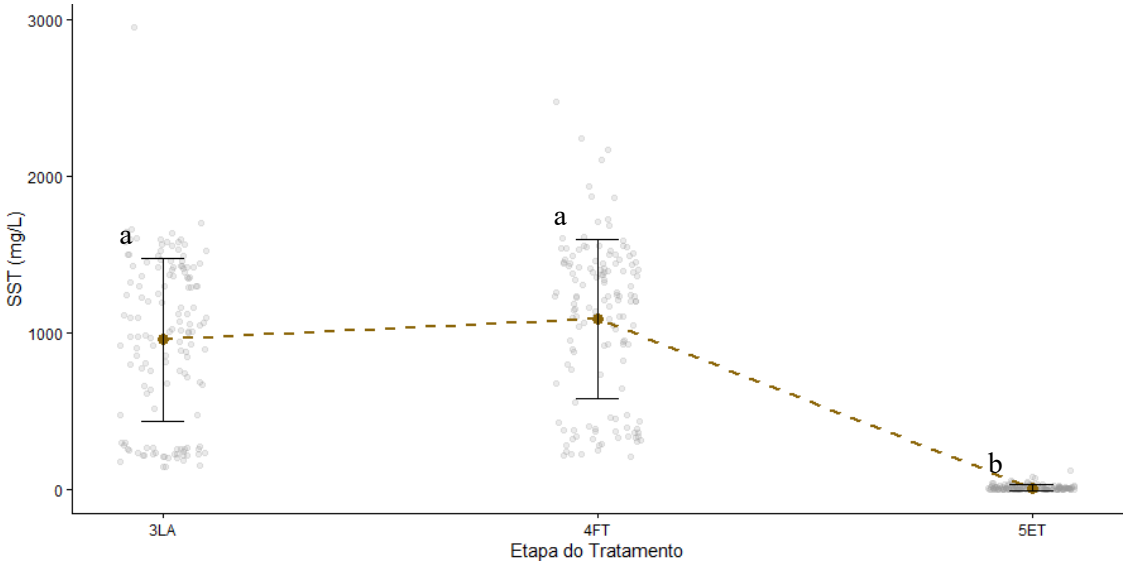
A literatura estabelece que a eficiência dos processos biológicos depende do equilíbrio entre carbono e nutrientes, sendo a proporção de 100:5:1 (DQO:N:P) a referência ideal para o desempenho de sistemas aeróbios (Hamza *et al.*, 2018; Metcalf; Eddy, 2014). No sistema em estudo, as águas residuárias apresentam razões DBO:N elevadas, caracterizadas por uma abundância de carbono orgânico frente à carga nitrogenada. Esse desequilíbrio de nutrientes compromete a estabilidade metabólica da biomassa, pois a carga carbonácea excessiva favorece

o crescimento acelerado de bactérias heterotróficas, que competem por oxigênio e espaço, inibindo o desenvolvimento das bactérias nitrificantes autotróficas, que possuem cinética de crescimento mais lenta (Hamza *et al.*, 2018; Metcalf; Eddy, 2014). Assim, a estagnação na remoção de nitrogênio entre as unidades 3LA e 4FT sugere que o sistema opera sob uma limitação de nutrientes e operacional, em que a oxidação do carbono consome a capacidade instalada das lagoas, impedindo a conversão plena da amônia residual.

A etapa final de polimento físico-químico (5ET) promoveu a redução definitiva do parâmetro para a menor mediana do sistema (5,04 mg/L), diferenciando-se estatisticamente das fases precedentes. Embora a tecnologia FAD não seja a ferramenta primária para remover frações dissolvidas, ela atua de forma decisiva na separação de frações nitrogenadas particuladas ou adsorvidas aos flocos biológicos residuais que escapam das lagoas aeróbias (Lucas, 2019; Nardi *et al.*, 2008). Assim, o FAD consolida a conformidade ambiental, compensando instabilidades biológicas e assegurando um descarte final de alta qualidade técnica.

Em relação aos SST, observou-se que as lagoas aeróbias precedentes (3LA e 4FT) operavam sob um cenário crítico de arraste de biomassa, com concentrações de SST excedendo 1.000 mg/L e medianas estatisticamente similares (agrupadas na letra “a” pelo teste de Dunn) (Gráfico 13).

Gráfico 13 - Comportamento das concentrações de sólidos suspensos totais (SST) nas diferentes unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas



Legenda: Os círculos marrons representam as médias aritméticas, acompanhadas por barras de erro indicando o desvio padrão. Os pontos cinzas representam as observações individuais. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística significativa entre as etapas pelo teste de Dunn ($p < 0,05$). A linha pontilhada no gráfico é meramente ilustrativa AR ou EB: águas residuárias; 1LA: tratamento primário; 2LA: reator anaeróbio; 3LA: reator

aeróbio 1; 4FT: do sistema de flotação; 5ET: efluente tratado pós-FAD. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

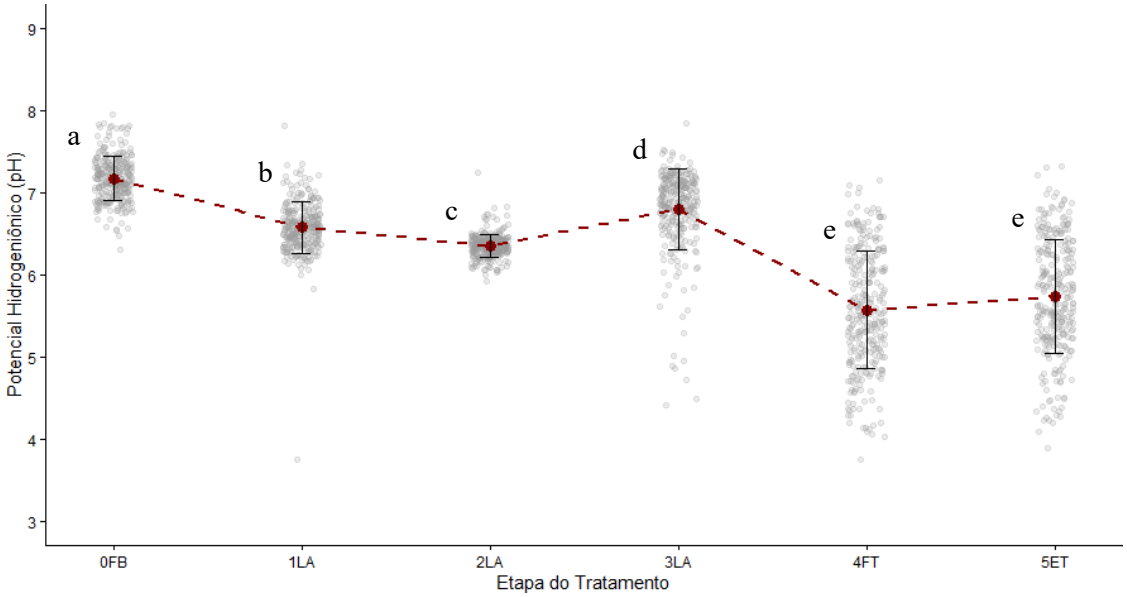
Esse acúmulo excessivo de sólidos nas fases finais do tratamento biológico indica falhas de transferência hidráulica ou instabilidade na sedimentação da biomassa. A ruptura desse padrão ocorreu na unidade de flotação (5ET), onde a mediana de SST foi reduzida para apenas 9 mg/L, isolando o efluente tratado como um grupo de desempenho superior. Esse comportamento ratifica a tese de Penetra (2003), que define o sistema FAD como uma "barreira eficaz", capaz de evitar o lançamento de biossólidos nos cursos d'água mesmo quando as etapas biológicas sofrem instabilidades ou perda de biomassa (Penetra, 2003).

Tecnicamente, essa remoção de mais de 98% dos sólidos provenientes das etapas aeróbias é potencializada pelo condicionamento químico prévio (coagulação e floculação). O uso de coagulantes desestabiliza coloides que não seriam removidos por sedimentação simples, transformando-os em flocos pequenos que possuem afinidade com as microbolhas injetadas (Aisse; Reali, 2001; Oliveira, 2020).

Apesar da alta eficiência, a persistência de variabilidade e a presença de picos esporádicos na saída final (ET) indicam que a gestão de sólidos finos permanece um desafio operacional. A manutenção dessa estabilidade exige rigoroso controle da dosagem química e monitoramento constante da vazão, garantindo que o sistema absorva choques de concentração sem comprometer a conformidade legal e a proteção dos corpos hídricos contra o assoreamento (Nardini, 2019; Papp, 2017).

O comportamento do pH (Gráfico 14) fornece evidências das transformações bioquímicas e físico-químicas no processo. Observou-se um declínio inicial significativo entre o AR (7,2) e o reator anaeróbio (2LA), fenômeno associado à fase de acidogênese, na qual a decomposição da matéria orgânica resulta na formação de ácidos voláteis (Jordão; Pessoa, 2017; Brito; Bastos, 2019). A recuperação em 3LA (6,9) sugere o início da degradação de ácidos ou processos de aeração. Contudo, a queda mais acentuada ocorre na unidade 4FT (5,5), mantendo-se estável no descarte final. Esta redução é decorrente da adição de coagulantes químicos no sistema FAD, que tendem a consumir a alcalinidade do meio e deslocar o pH para faixas mais ácidas durante a formação dos flocos (Lucas, 2019; Penetra, 2003). Este condicionamento é determinante para a performance do sistema, permitindo que a unidade FAD atue como uma barreira estratégica contra a ineficiência biológica (Penetra, 2003; Bocchi, 2022)."

Gráfico 14 - Comportamento do pH nas diferentes unidades do sistema de tratamento de efluentes avícolas



Legenda: Os círculos vermelhos representam as médias aritméticas, acompanhadas por barras de erro indicando o desvio padrão. Os pontos cinzas representam as observações individuais. Letras minúsculas distintas indicam diferença estatística significativa entre as etapas pelo teste de Dunn ($p < 0,05$). A linha pontilhada no Gráfico é meramente ilustrativa FB: águas residuárias; 1LA: tratamento primário; 2LA: reator anaeróbio; 3LA: reator aeróbio 1; 4FT: do sistema de flotação; 5ET: efluente tratado pós-FAD. Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves (2026).

O comportamento do pH forneceu evidências das transformações bioquímicas ocorridas no sistema, destacando-se um declínio inicial significativo entre o AR e o reator anaeróbio (2LA). Esse fenômeno está diretamente associado à fase de acidogênese da digestão anaeróbia. Em ambientes anaeróbios, os processos de digestão ácida comandam a etapa inicial de tratamento, na qual a decomposição da matéria orgânica complexa por microrganismos resulta na formação de ácidos voláteis. O acúmulo desses subprodutos na fase líquida é o responsável por deslocar o equilíbrio químico e reduzir o pH, caracterizando uma fase de intensa atividade metabólica antes da estabilização de DBO e DQO (Jordão; Pessoa, 2017; Brito; Bastos, 2019).

A trajetória de acidificação observada da etapa 3LA para o 4FT reflete o consumo de alcalinidade inerente à hidrólise dos coagulantes metálicos, conforme corroborado por Lucas (2019), que identifica, nesta faixa de pH, a zona de máxima eficiência para o cloreto férrico. Esse condicionamento é o que permite a precipitação efetiva do fósforo, mecanismo explicado por Tré, Quadros e Frinhani (2015) como a adsorção de fosfatos nos produtos de hidrólise metálica. Assim, o sistema FAD cumpre o papel de barreira estratégica, conforme definido por Penetra (2003), superando a fase assintótica do tratamento biológico e garantindo a estabilidade necessária para efluentes complexos de abatedouros, conforme discutido por Bocchi (2022).

Essa condição de pH é determinante para a performance do sistema, visto que a eficiência na remoção de fósforo é estritamente dependente do condicionamento químico. De acordo com Aisse e Reali (2001) e Penetra (2003), a solubilidade mínima dos precipitados de fósforo (como o fosfato férrico, $FePO_4$) ocorre em faixas específicas de pH, situando-se em torno de 5,3.

O Quadro 6, abaixo, sintetiza os resultados obtidos para as etapas de tratamento e as propostas de melhoria para o tratamento.

Quadro 6 – Síntese do diagnóstico operacional, eficiências e propostas de melhoria para as etapas de tratamento

Etapa de Tratamento	Eficiência Observada	Possíveis Problemas Identificados	Soluções Sugeridas
Tratamento Primário (1LA)	Baixa remoção de DBO e DQO; aumento significativo de Nitrogênio (+79%).	Processos de hidrólise e lise celular liberando nitrogênio para a fase líquida.	Otimização da eficiência de remoção física nas peneiras e caixas de gordura para reduzir a carga de sólidos e gordura águas residuárias (Montagna, 2015; Nardino, 2019).
Reator Anaeróbio (2LA)	Intensa amonificação (pico de 56,56 mg/L de N); remoção de DBO estagnada em níveis baixos.	Fase de acidogênese reduzindo o pH (6,4); desempenho abaixo do potencial biológico devido a picos de carga.	Ajuste do tempo de detenção hidráulica (TDH) conforme a carga orgânica sazonal e avaliação da substituição por reatores de alta taxa (UASB) para maior controle operacional (Von Sperling, 2017; Jesus, 2018).
Lagoas Aeradas (3LA e 4FT)	"Desempenho biológico em níveis insatisfatórios" (remoção de DBO de apenas 20-26%); nitrificação estável, porém precária.	Arraste crítico de biomassa (SST > 1.000 L/s); deficiência de oxigênio dissolvido; desequilíbrio na razão C:N.	Manutenção da biomassa em suspensão e ajuste da taxa de oxigênio (Von Sperling, 2017). Ajuste da razão DQO:N:P para 100:5:1 para favorecer bactérias nitrificantes (Hamza *et al.*, 2018; Metcalf; Eddy, 2014).
Sistema FAD (5ET)	Polimento com eficiência global > 97%; remoção de mais de 98% dos biossólidos residuais.	Acidificação do descarte final (pH 5,5); aumento nas concentrações de sódio; risco iminente de sobrecarga por processar carga orgânica bruta.	Padronização operacional via Procedimento Operacional Padrão (POP) e controle de pH com alcalinizantes para compensar o consumo de alcalinidade pelo PAC (Nardino, 2019; Aisse; Reali, 2001; Lucas, 2019).

Fonte: CASTELO BRANCO, Paulo Henrique Alves, 2026

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitem confirmar a primeira hipótese ao evidenciarem que o FAD produz uma redução estatisticamente significativa nas concentrações dos principais poluentes. Observou-se um ganho real na eficiência média de remoção de DBO e DQO, com as concentrações finais de DBO declinando para uma média de 21,2 mg/L. A eficiência na remoção de SST também apresentou salto significativo, isolando o efluente tratado (5ET) como um grupo de desempenho superior em relação às etapas biológicas precedentes, das quais o FAD removeu mais de 98% dos sólidos residuais. Embora o nitrogênio amoniacal não tenha apresentado diferença estatística entre os regimes Pré e Pós-FAD em termos de eficiência global, a unidade de flotação atuou decisivamente no polimento de frações particuladas, mantendo o descarte na menor mediana do sistema.

A segunda hipótese foi igualmente validada, demonstrando que a tecnologia FAD promove uma melhoria mensurável na sustentabilidade operacional e na qualidade do efluente. O sistema revelou capacidade de suporte, mantendo o padrão de descarte de fósforo total estável, mesmo diante de um incremento na carga de águas residuárias. Além disso, houve redução significativa de óleos, graxas e sulfetos, conferindo maior qualidade sanitária ao efluente e alinhando a operação industrial aos princípios da economia circular e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, 12 e 13.

Contudo, a avaliação detalhada das etapas das unidades operacionais revelou uma vulnerabilidade estrutural caracterizada pela persistência do “desempenho biológico em níveis insatisfatórios" entre o reator anaeróbio (2LA) e o águas residuárias do flotador (4FT). Nesse trecho, as eficiências de remoção de DBO ficaram significativamente abaixo dos padrões da literatura, forçando o FAD a atuar como pilar principal de depuração de carga bruta, e não apenas como polimento terciário. Esse cenário é agravado pela estabilidade precária na nitrificação, decorrente de desequilíbrios na razão C:N e pela trajetória de acidificação (pH 5,5) induzida pelo consumo de alcalinidade dos coagulantes.

Conclui-se, portanto, que, embora o sucesso do FAD assegure a conformidade legal, o sistema apresenta um risco de sobrecarga por saturação. Torna-se imperativo otimizar a operação das lagoas biológicas, ajustando o tempo de detenção hidráulica e os níveis de oxigênio dissolvido para restaurar o equilíbrio da cadeia de tratamento. A adoção de práticas integradas, como o Procedimento Operacional Padrão (POP) desenvolvido, é fundamental para garantir que o FAD retorne à sua função precípua de polimento avançado, assegurando a resiliência e a sustentabilidade ambiental do setor agroindustrial no longo prazo.

REFERÊNCIAS

AISSE, M. M. *et al.* Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de flotação. In: CHERNICHARO, C. A. L. (Coord.). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Projeto Prosab, Abes, 2001. p. 219-228.

AL-GHEETHI, A. *et al.* Characteristics of Chicken Slaughterhouse Wastewater. **ResearchGate**, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325036983. Acesso em: 31 ago. 2025.

ALMEIDA, A. C. *et al.* Determinação das condições operacionais para o tratamento terciário de efluente frigorífico pelo processo integrado Fenton-Coagulação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 2, p. 273-282, 2015.

ANDRADE JUNIOR, A. **Tratamento de efluentes industriais de um frigorífico de suínos visando a remoção de nitrogênio**. 2017. 44 f. TCC (Graduação em Engenharia Química) - Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2017.

ARIANO, G. C**. Coagulação, floculação e flotação do efluente de reatores anaeróbios, tratando esgoto sanitário**. 2009. 185 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da USP, São Carlos, 2009.

ASSMANN, L. M. **Diagnóstico e prognóstico de um sistema de efluente de frigorífico de suínos para remoção de nitrogênio amoniacal**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

ATCHALA, M. S. R. *et al.* Sustainable biological system for the removal of high strength ammoniacal nitrogen and organic pollutants in poultry waste processing industrial effluent. **Sustainable Chemistry for the Environment**, v. 9, 100199, 2025.

AZIZ, S. Q. *et al.* Performance of biological treatment processes for removal of surfactants from wastewater. **Journal of Environmental Management**, Londres, v. 217, p. 380-391, 2018.

BATALHA, M. O. (Coord.). **Gestão Agroindustrial**: conceitos, modelos e estudos de casos. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

BAZRAFSHAN, E**.** *et al.* Slaughterhouse wastewater treatment by combined chemical coagulation and electrocoagulation process. **PLOS ONE**, 2012.

BENETTI, A. D. **Tratamento físico-químico de águas residuárias domésticas e industriais combinadas entre si**. 1987. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – UFRGS, Porto Alegre, 1987.

BERTOLOSSI, A. C.; NEDER BRANDÃO, C. C. Avaliação de ultrafiltração como alternativa à flotação por ar dissolvido no pós-tratamento de efluentes. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 2, p. 315-325, 2021.

BOCCHI, R. **Otimização do sistema de tratamento composto por reator eletroquímico seguido por flotação por ar dissolvido: aplicação em efluente de frigorífico e matadouro de suínos**. 2022. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – UTFPR, Medianeira, 2022.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 maio 2011.

BRITO, A. **C. Flotação por ar dissolvido como pós-tratamento de efluentes de lagoas de estabilização**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – UFRN, Natal, 2016.

BUSTILLO-LECOMPTE, C. F.; MEHRVAR, M. Slaughterhouse wastewater: characteristics, treatment and management. **Journal of Environmental Management**, v. 161, p. 287-302, 2015.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: Reatores Anaeróbios. 2. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007 [1, 23; 16, 510].

CREMONINI, R. A. *et al.* **Tratamento de efluentes da indústria de frigoríficos**. Curitiba: Embrapa Suínos e Aves, 2018.

DEL NERY, V. *et al.* Poultry slaughterhouse wastewater treatment plant for high quality effluent. **Water Science and Technology**, Londres, v. 75, n. 4, p. 912-921, 2016 [1, 23; 16, 507].

DEZOTTI, M**. Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos**. Rio de Janeiro: E-papers, 2008.

ECKENFELDER, W. W**. Industrial water pollution control**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Waste treatment upgrading poultry processing facilities to reduce pollution**. Washington: U.S. EPA, 1973.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE**. Diagnóstico Ambiental das Indústrias de Abate do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: FEAM, 2010.

FERREIRA, I. T. R. *et al.* Tratamento De Efluentes Industriais De Uma Fábrica Pet Food. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 17, n. 1, p. 608-625, 2024.

FRIGULIO, L. G. **Aplicação de pré-tratamento para redução de poluentes orgânicos em efluentes de agroindústrias**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – UNICAMP, Campinas, 2023.

FRINHANI, E. M. D.; SANTOS, C. S. **Determinação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção físico-química de fósforo em uma planta de abate e industrialização de aves**. 2014. 53 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) – Unoesc, Joaçaba, 2014.

HAMZA, R. A. *et al.* Optimization of organics to nutrients (COD:N:P) ratio for aerobic granular sludge treating high-strength organic wastewater. **Science of the Total Environment**, v. 645, p. 127-135, 2018.

JESUS, J. R. **Diagnóstico e proposição de melhorias no sistema de tratamento de efluentes de abatedouro de aves**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Unioeste, Cascavel, 2018.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Abes, 2017 [1, 29; 20, 565].

LUCAS, J. F. R. **Flotação por ar dissolvido no pós-tratamento de efluente de indústria de produtos lácteos visando ao reúso**. 2019. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Unioeste, Cascavel, 2019.

MARINHO, I. Q. **Tratamento de efluentes da indústria alimentícia**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – UFU, Uberlândia, 2017.

MATSUMURA, E. M. **Perspectivas para conservação e o uso de água na indústria de alimentos: estudo de uma unidade de processamento de frangos**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – USP, São Paulo, 2007.

MOHAN, S. V. *et al.* Sustainable biological system for removal of high-strength ammoniacal nitrogen. **Bioresource Technology**, Amsterdã, v. 314, 2020.

MONTAGNA, T. **Diagnóstico e quantificação de efluentes gerados em frigorífico**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – UTFPR, Pato Branco, 2015.

NARDINO, A. **Concepção do mapa de processo e POP em ETE de frigorífico de aves**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – UTFPR, Medianeira, 2019.

NJOYA, F. A. *et al.* **Poultry slaughterhouse wastewater treatment**. Cape Peninsula University of Technology, 2019.

NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais**. 6. ed. Aracaju: J. Andrade, 2012 [1, 34; 6, 141].

OLIVO, R. **O Mundo do Frango, Cadeia Produtiva da Carne do Frango**. Criciúma: [s.n.], 2006.

PADILHA, E. E. Dimensionamento de uma nova estação de tratamento de efluentes em uma empresa de saneantes domissanitários. **Revista Vincci**, v. 6, n. 1, 2021.

PAPP, G. T. *et al.* Pós-tratamento físico-químico por flotação FAD em efluentes de laticínios. **Tecno-Lógica**, Santa Cruz do Sul, v. 23, n. 2, p. 101-110, 2019.

PENETRA, R. G. **Flotação aplicada ao pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio em leito expandido tratando esgoto sanitário**. 2003. 288 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – USP, São Carlos, 2003 [1, 36; 13, 372].

PEREIRA, E. E. S. B. *et al.* Complexo da avicultura de corte: importância para o agronegócio brasileiro. **Revista Interface Tecnológica**, v. 20, n. 1, p. 470-482, 2023.

RODRIGUES, L. S. *et al.* Tratamento de efluentes de abatedouro de frangos por meio de reator UASB seguido de filtro anaeróbio. **Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.**, v. 68, n. 1, p. 224-232, 2016.

SILVA, G.; DUTRA, P. R. S.; CADIMA, I. M. **Higiene na indústria de alimentos**. Rede e-Tec Brasil, 2016.

SINGH, A. *et al.* Advanced membrane technologies for the treatment of slaughterhouse wastewater: A review. **Journal of Water Process Engineering**, v. 53, 103632, 2023.

SOUSA, R. M.; SIQUEIRA, R. L. Os impactos ambientais de efluentes industriais: estudo de caso. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 45–58, 2022.

TONIETTO, J. **Avaliação das denúncias ambientais relacionadas a ETEs industriais no RS**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – UFRGS, Porto Alegre, 2022.

VON SPERLING, M**. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: Lagoas de estabilização. v. 3. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2017.

YAAKOB, M. A. *et al.* Characteristics of chicken slaughterhouse wastewater. **Chemical Engineering Transactions**, v. 63, 2018.

ZIMINA, M. *et al.* Poultry processing waste as a perspective source of bioactive compounds: A review. **Sustainability**, v. 14, n. 3, 1546, 2022.

APÊNDICE – PRODUÇÃO TÉCNICA E TECNOLÓGICA (PTT) PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO (POP)



PAULO HENRIQUE ALVES CASTELO BRANCO

PRODUÇÃO TÉCNICA E TECNOLÓGICA (PTT)

PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO (POP)

Bambuí/MG

2026

FICHA TÉCNICA PARA A PRODUÇÃO TÉCNICA E TECNOLÓGICA

2026. MESTRADO PROFISSIONAL EM SUSTENTABILIDADE E TECNOLOGIA AMBIENTAL (MPSTA) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG)

Não há direitos reservados. A reprodução está autorizada, no todo ou em parte, desde que a obra original seja devidamente referenciada.

GESTORES DO IFMG:

IFMG/BAMBUÍ – Fazenda Varginha – Rodovia Bambuí/Medeiros – Km 05

Caixa Postal 05 – Bambuí – MG - 38900-000 - www.bambui.ifmg.edu.br

REITOR DO IFMG – Prof. Dr. Rafael Bastos Teixeira

PRÓ-REITORA DE INOVAÇÃO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - Prof. Dra. Gislayne Elisana Gonçalves

DIRETOR GERAL DO IFMG/BAMBUÍ - Prof. Dr. Humberto Garcia de Carvalho

DIRETOR DE INOVAÇÃO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO DO IFMG/BAMBUÍ – Prof. Dr. Gustavo Augusto Soares

COORDENADORA DO MPSTA/IFMG BAMBUÍ – Prof. Dra. Ana Cardoso Clemente Ferreira Filha de Paula

AUTORES

Paulo Henrique Alves Castelo Branco (aluno)

Dra. Sibele Augusta Ferreira Leite (orientador/a)

IMAGENS

Catalogação - Fonte Biblioteca IFMG - Campus Bambuí

Elaborada por Douglas Bernardes de Castro- CRB-6/2802

INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Minas Gerais
Campus Bambuí

Apresentação

O presente capítulo apresenta o Produto Técnico Tecnológico (PTT) desenvolvido como requisito parcial para a conclusão do Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental (MPTSTA) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), Campus Bambuí.

Este PTT está enquadrado na tipologia Material Técnico Orientativo, na modalidade Manual/Protocolo, e no subtipo Procedimento Operacional Padrão (POP). Sua elaboração fundamenta-se nos resultados obtidos na pesquisa intitulada “Avaliação da Flotação por Ar Dissolvido no Pós-Tratamento de Águas Residuárias de Frigorífico Avícola”, com o objetivo de contribuir para a padronização da operação do sistema de Flotação por Ar Dissolvido (FAD), promovendo maior eficiência operacional e uniformidade nos procedimentos adotados.

O produto foi desenvolvido a partir da dissertação de mestrado intitulada “Avaliação da Flotação por Ar Dissolvido no Pós-Tratamento de Águas Residuárias de Frigorífico Avícola”, orientada pela Profa. Dra. Sibele A. Ferreira Leite e defendida em 13 de julho de 2026. Como resultado da pesquisa, foi elaborado este Procedimento Operacional Padrão (POP), visando disponibilizar orientações técnicas para operação, monitoramento e controle do sistema de FAD aplicado ao tratamento de efluentes de frigoríficos avícolas, contribuindo para a melhoria contínua do desempenho do processo e para a gestão ambiental dos empreendimentos do setor.

Logo Empresa	**PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO (POP) SISTEMA DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO DO TRATAMENTO TERCIÁRIO DA ETE**	**Data de elaboração**: 28/05/2026
		Cód.: POP-MA-ETE-001
		Versão: 01
		Data de revisão:
Área: Frigorífico Avícola		**Próxima revisão**: 28/05/2027

PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO (POP)
SISTEMA DE FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO DO TRATAMENTO TERCIÁRIO DA ETE

Elaborado por:	Revisado por:	Aprovado por:
Paulo Henrique Alves Castelo Branco	-	-

1. OBJETIVO

Padronizar a operação do sistema de flotação por ar dissolvido do tratamento terciário da Estação de Tratamento de Efluentes (ETE).

2. CAMPO DE APLICAÇÃO

Tratamento terciário da ETE.

3. RESPONSABILIDADES

Atividades	Responsável
Operação e Monitoramento	Operador de ETE
Coletas de amostras e análises internas	Analista de laboratório
Manutenção	Equipe de manutenção

4. REFERÊNCIAS

GRATT. INDÚSTRIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL. Manual Flotador por Ar Dissolvido GFAD 400.

5. DESCRIÇÃO DAS ATIVIDADES

5.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

5.1.1. PROCESSO DE REAÇÃO FÍSICO-QUÍMICO

O efluente bruto é inserido no sistema a partir de uma tubulação, denominada tubulação de reação físico-química, pois é onde ocorrerá a dosagem de coagulante (PAC- Policloreto de Alumínio), floculante (Polímeros) e microbolhas. Esta tubulação é dimensionada para garantir um tempo de coagulação e floculação adequado para se obter eficiência no tratamento. O processo de coagulação e floculação ocorre na tubulação de reação físico-química. Para que a flotação tenha resultados satisfatórios, além da presença de microbolhas de ar com distribuição adequada, é necessário que se promovam a coagulação química e a floculação das partículas dispersas no meio líquido. O processo de coagulação e floculação nada mais é do que o processo de formação de flocos. A primeira etapa é a coagulação que é feita com a adição do PAC, a qual necessita de um tempo pequeno para ocorrer (poucos segundos), sendo que, com a ocorrência da coagulação, surgem partículas com dimensões que variam de 0,5 a 5μm de diâmetro. A etapa seguinte é a floculação, que é realizada com a adição de polímeros, onde as partículas primárias agregam-se em consequência das colisões promovidas, o que resulta na formação de flocos maiores, com dimensões que variam de 100 μm a 5000 μm de diâmetro.

Este processo químico garante maior rendimento do equipamento, permitindo a correção de fatores presentes no efluente bruto, como turbidez, cor, odor, sólidos em suspensão, DBO, DQO etc.

5.1.2. BOMBAS DE MICROBOLHAS (MULTIESTÁGIO)

As bombas centrífugas multiestágio recebem a água vinda da descarga de efluente tratado do Flotador, juntamente com uma quantidade de ar em torno de 10% da vazão nominal da bomba. Essa mistura "água + ar" é pressurizada dentro da bomba, o que provoca a saturação dessa mescla, resultando no que chamamos de microbolhas, que são bolhas de ar (com diâmetros que variam de 30 μm a 50 μm) suspensas no meio aquoso (o controle de entrada de ar na tubulação é realizado através de medidor de vazão tipo rotâmetro e uma válvula). Para garantir a formação de bolhas perfeitas, é necessário um tempo de saturação adequado, que é possível adotando-se uma tubulação com dimensões determinadas a partir de cálculos. Essa mistura é despressurizada rapidamente ao ser inserida no tanque principal, onde se encontra o efluente bruto. A geração de microbolhas é um subprocesso do sistema de flotação. São micropartículas de ar saturadas em água, com tamanho de 20 μm a 100 μm, geradas por meio de um sistema de vaso de saturação. As microbolhas têm o aspecto de uma nuvem meio branca quando inserida no líquido, e, quando atinge a superfície, é possível visualizar pequenas névoas de ar, deixando o efluente. Sua função é se agrupar aos flocos, diminuindo a densidade dele em relação ao líquido em que se encontra. Como a função natural do ar é seguir para a superfície, sua função é flutuar ou levar o floco para cima, sendo que, quanto maior o volume de bolhas ligadas aos flocos e partículas, menor será a densidade dos conjuntos floco/bolha. Quanto mais bolhas são incorporadas ao efluente, melhor será o consumo de químicos, a remoção de cargas e a clarificação.

5.1.3. TANQUE PRINCIPAL

No tanque principal, ou Flotador, propriamente dito, é onde ocorre o processo final do tratamento de flotação. O efluente bruto, com a devida formação dos flocos, recebe a microbolha dentro da tubulação de reação físico-química, o que resulta na formação de flocos com aglomerados gasosos (microbolhas), o que torna a partícula floco-bolha menos densa que o meio aquoso, causando o arraste deste aglomerado até a superfície da célula de flotação. Na superfície do Flotador, encontram-se raspadores que extraem constantemente este aglomerado, resultando na clarificação do efluente. O tanque do Flotador é dimensionado para permitir um tempo de detenção hidráulica e uma taxa de aplicação adequada, o que corrige, também, fenômenos de arraste e possíveis turbulências.

5.1.4. LODO

O lodo é o subproduto produzido no Flotador; ele é formado pela adição dos químicos e retirado com o auxílio das microbolhas e das pás raspadoras. Esse resíduo é encaminhado para um tanque onde recebe a adição do Polímero Catiônico, o qual vai fazer com que as partículas sólidas se juntem o máximo possível e se separem da parte aquosa. Após essa adição, o lodo é encaminhado automaticamente ao Decanter, que é o equipamento responsável por essa separação. A água retirada desse processo é conhecida como "clarificado" e é encaminhada para a Lagoa Aeróbia, onde passará novamente pelos processos da ETE. Já o lodo retirado pelo Decanter é disposto em caçambas que serão destinadas a empresas terceirizadas e legalizadas para fazer o tratamento dele.

5.2. PRODUTOS QUÍMICOS

5.2.1. POLICLORETO DE ALUMÍNIO

Produto coagulante líquido adicionado na tubulação de reação físico-química onde haverá, posteriormente, agitação promovida pela injeção de microbolhas. Isto é feito a fim de garantir uma perfeita homogeneização do produto com a água a ser tratada. A solução de PAC é armazenada no tanque com capacidade de 15.000 L.

5.2.2. PREPARO DA SOLUÇÃO

- Não é feita a diluição;
- O PAC já vem pronto para uso;
- Solicitar reposição de PAC quando o tanque atingir o nível de 1.000 L.

5.2.3. POLÍMERO ANIÔNICO

Produto floculante utilizado no processo de decantação e clarificação do efluente. Assim como o PAC é adicionado na tubulação de reação físico-química, a solução de Polímero Aniônico é armazenada em 2 tanques separados com capacidade de 5.000 L cada.

5.2.4. PREPARO DA SOLUÇÃO

- Conferir se o registro de saída do tanque se encontra fechado no tanque onde será preparada a nova solução;
- Abrir o registro de abastecimento de água;
- Colocar aproximadamente 4.000 litros de água no tanque;

- Ligar o misturador;
- Adicionar 3 kg do Polímero Aniônico aos poucos;
- Após a diluição completa do produto, acrescentar água até atingir o nível de 5.000 L;
- Aguardar sob agitação por 1 hora;
- Abrir o registro de saída do tanque para iniciar o processo de dosagem;
- Quando um dos tanques que já contêm solução preparada atingir o nível de 2.500 L, iniciar a preparação de nova solução de Polímero Aniônico no outro tanque;
- Repetir o ciclo a cada nova solução preparada.

5.2.5. ANTIESPUMANTE

Produto desenvolvido para combater a formação de espuma e evitar a sua formação em estações de tratamento. É adicionado ao processo final do Flotador. A solução de antiespumante é armazenada em 1 bombona de 50 L.

5.2.6. PREPARO DA SOLUÇÃO

- Colocar 1 litro de antiespumante;
- Abrir o registro de abastecimento de água;
- Completar até atingir o nível de 50 L;
- Repetir o ciclo a cada nova solução preparada.

5.3. OPERAÇÃO DO SISTEMA

5.3.1. BOMBAS DE ALIMENTAÇÃO

O sistema de alimentação do Flotador por ar dissolvido é abastecido pelas bombas centrífugas que recalcam o efluente da 3ª Lagoa Aerada do Sistema de Tratamento de Efluente Secundário. São 3 bombas, sendo duas para operação e uma reserva. O sistema é operado com uma bomba apenas, mas, caso seja necessário trabalhar com uma vazão de tratamento maior, opera-se o sistema com duas bombas e mantém-se uma bomba-reserva. Antes de iniciar o processo de tratamento, executar os seguintes passos:

- Verificar as condições das bombas e motores;
- Abrir o registro da bomba selecionada;
- Retirar a entrada de ar, caso houver;

- Ligar a bomba selecionada no painel supervisório.

5.3.2. BOMBAS DE MICROBOLHAS

O sistema de microbolhas do Flotador por ar dissolvido é gerado pelas bombas multiestágios que utilizam a água vinda da descarga de efluente tratado do Flotador, ocorrendo a mistura água + ar que é pressurizada dentro da bomba, ocorrendo a formação de microbolhas. São 3 bombas, sendo uma para operação e duas reservas. Antes de iniciar o processo de tratamento, executar os seguintes passos:

- Verificar as condições das bombas e motores;
- Abrir o registro da bomba selecionada;
- Ligar a bomba selecionada no painel supervisório;
- Ajustar os barômetros a uma pressão de 0,5 bar através do registro nas bombas;
- Abrir manualmente as 12 válvulas regulando até atingir a pressão de 5 bar no manômetro.

5.3.3. RASPADORES

O sistema de retirada do lodo produzido no processo de tratamento é retirado na superfície Flotador, por meio dos raspadores. Antes de iniciar o processo de tratamento, executar os seguintes passos:

- Verificar as condições das correntes, engrenagens e das pás raspadoras;
- Ligar o raspador no painel supervisório.
- Ajustar o nível de raspagem adequado de acordo com a vazão e/ou formação de lodo na superfície através dos registros reguladores de altura da comporta de saída.

5.3.4. PAINEL SUPERVISÓRIO

O sistema do Flotador por ar dissolvido é operado através do painel supervisório, sendo que, para iniciar o tratamento do efluente, devem-se executar os seguintes passos:

- No painel inicial, selecionar “ALIMENTAÇÃO DO FLOTADOR”;
- Ligar a bomba selecionada;
- Ligar duas bombas caso seja necessário trabalhar com uma vazão de tratamento maior;
- Voltar ao menu inicial;
- Selecionar “BOMBAS DE MICROBOLHAS”;
- Ligar a bomba selecionada;
- Voltar ao menu inicial;

- Selecionar “BOMBA DE COAGULANTE”;
- Ligar a bomba selecionada;
- Voltar ao menu inicial;
- Selecionar “AGITADORES POLÍMEROS”;
- Ligar o agitador “POLÍMERO FLOTADOR”;
- Ajustar a velocidade “RPM” desejada, conforme a necessidade de dosagem;
- Voltar ao menu inicial;
- Selecionar “POLÍMERO FLOTADOR”;
- Ligar a bomba selecionada;
- Voltar ao menu inicial;
- Selecionar “RASPADOR FLOTADOR”;
- Habilitar o raspador;
- Ajustar a velocidade “RPM” desejada conforme a necessidade de operação do sistema de raspagem do lodo;
- Voltar ao menu inicial.

5.4. LIMPEZA DO SISTEMA

5.4.1. LIMPEZA DO FLOTADOR

A limpeza do Flotador é realizada a cada 15 dias, aos sábados, exceto em sábados que houver abate. Efetuar os seguintes passos para realizar o procedimento de limpeza:

- Abrir os dois registros de drenagem na parte inferior do Flotador;
- Esgotar toda a água do Flotador;
- Lavar o interior do Flotador com água corrente.

5.4.2. LIMPEZA DOS TANQUES DE PRODUTOS QUÍMICOS

A limpeza dos tanques de produtos químicos é realizada a cada 6 meses ou de acordo com a necessidade. Executar os seguintes passos para realizar o procedimento de limpeza:

- Desconectar as mangueiras das bombas dosadoras;
- Drenar o restante de produto decantado;
- Lavar o interior do tanque com água corrente.

5.5. MANUTENÇÃO PREDITIVA

A manutenção preditiva é de suma importância, a fim de detectar alguma anormalidade e garantir o bom funcionamento do equipamento.

Pontos importantes:

- Verificação das pás raspadoras (garante uma melhor retirada do lodo acumulado na superfície);
- Lubrificação da corrente das pás raspadoras;
- Lubrificação periódica dos rolamentos dos mancais do flotador (deve ser realizada a cada 48 horas de operação);
- Realização da análise de vibração mensal das bombas de microbolhas;
- Verificação do nível do óleo do motor redutor.

5.6. LUBRIFICAÇÃO

5.6.1. LUBRIFICAÇÃO DO RASPADOR

Lubrificar a corrente de acionamento das pás raspadoras a cada 3 dias utilizando como lubrificante óleo ISO VG 220, o que deve ser feito por meio de almotolia. A lubrificação da corrente dever ser realizada uma vez por semana (Figura 1).

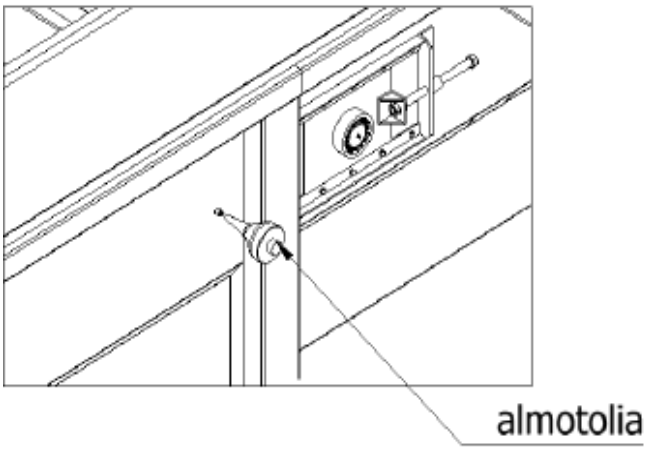


Figura 1 – Almotolia.

5.6.2. LUBRIFICAÇÃO DO EIXO MOVIDO

A lubrificação do eixo movido é feita no ponto mostrado na Figura 2, através da graxeira reta ¼" UNF DIN1404. Este ponto serve para lubrificar a bucha de bronze da engrenagem do eixo movido, como mostrado na Figura 3. A lubrificação da bucha deve ser realizada 1 vez por dia.

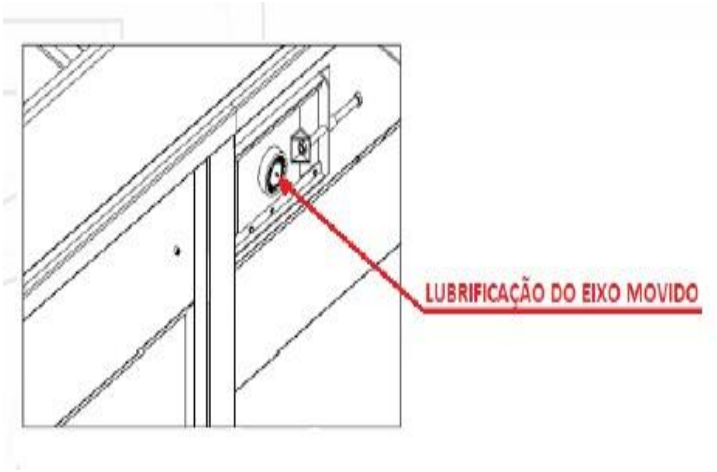


Figura 2 – Eixo movido.

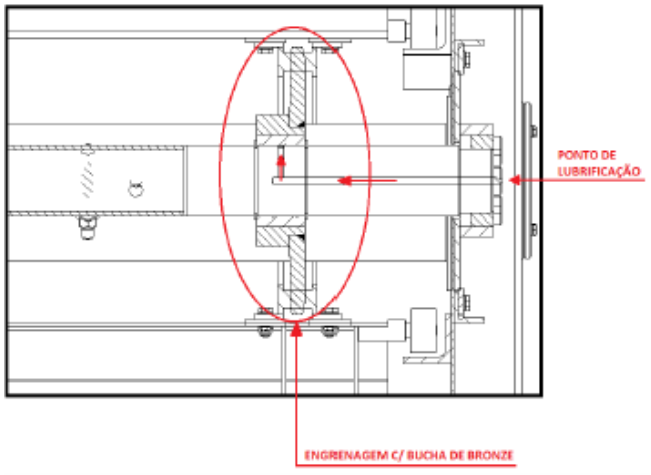


Figura 3 – Bucha de bronze.

5.6.3. LUBRIFICAÇÃO DO EIXO MOTOR

A lubrificação do eixo motor é feita no ponto mostrado na Figura 4, através da graxeira reta m6 BSP DIN71412. Este ponto serve para lubrificar o rolamento do mancal, como mostrado na Figura 5. A lubrificação nos mancais deve ser realizada uma 1 vez por mês.

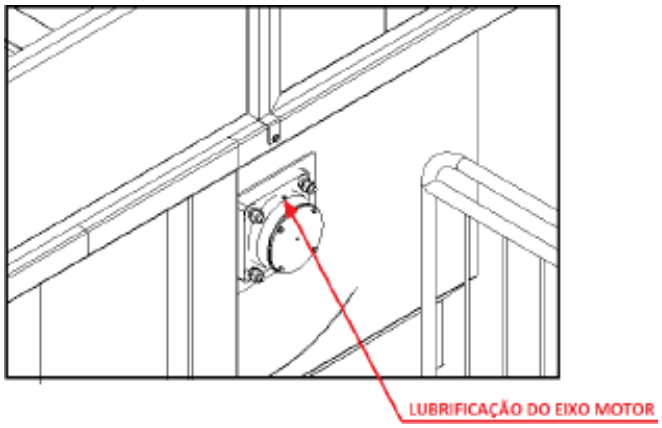


Figura 4 – Lubrificação do eixo motor.

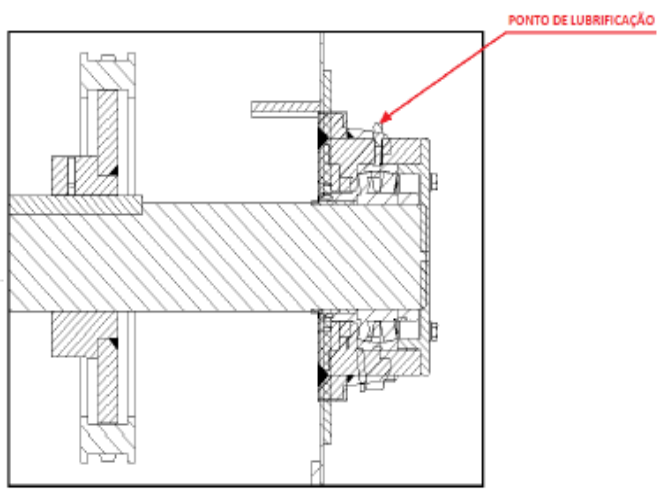


Figura 5 – Ponto de lubrificação do eixo motor.

6. MONITORAMENTO

O estabelecimento dos parâmetros de monitoramento considerou os pontos críticos identificados no diagnóstico operacional do sistema, especialmente a variabilidade do processo biológico anterior ao FAD e a necessidade de maior controle da etapa físico-química de polimento. Os parâmetros de monitoramento foram organizados de forma a permitir a avaliação do sistema sob duas perspectivas complementares:

- Avaliação ao longo do processo (por etapas da ETE) → identificação de ineficiências operacionais;
- Avaliação do desempenho final do sistema → verificação da conformidade ambiental e eficiência global do FAD.

6.1. PARÂMETROS OPERACIONAIS

Parâmetro	**Objetivo de controle**	**Frequência**	**Tipo de avaliação**
Vazão (L/s)	Estabilidade hidráulica	Contínuo	Processo
Pressão das microbolhas (bar)	Geração eficiente de bolhas	Contínuo	Processo
Taxa de recirculação (%)	Eficiência de flotação	Diário	Processo
Dosagem de PAC (mg/L)	Otimização da coagulação	Diário	Processo

6.2. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Parâmetro	**Faixa recomendada**	**Frequência**	**Tipo de avaliação**
pH	5,5 – 6,5	Diário	Processo + Final

Temperatura (°C)	Controle operacional	Diário	Processo
Turbidez / aspecto visual	Qualidade da clarificação	Diário	Final
Óleos e graxas (mg/L)	Redução pelo FAD	Mensal	Final

6.3. PARÂMETROS DE DESEMPENHO

Parâmetro	**Meta operacional**	**Frequência**	**Tipo de avaliação**
DBO (mg/L)	< 60 mg/L	Semanal	Final
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	Monitoramento	Mensal	Processo
SST (mg/L)	< 30 mg/L	Semanal	Processo + Final
Fósforo total (mg/L)	Redução conforme sistema	Mensal	Final

7. DESVIOS

- Qualquer dúvida sobre a operação do sistema do flotador, entrar em contato com o Analista de Laboratório ou Analista de Meio Ambiente;
- Qualquer dúvida sobre os produtos químicos, preparo das soluções, dosagens, entrar em contato com o Analista de Laboratório ou Analista de Meio Ambiente;
- Caso o efluente não esteja coagulando bem ou não esteja formando flocos de lodo adequados, verificar a concentração dos produtos químicos, nível dos tanques de soluções, tubulações entupidas, problemas nas bombas dosadoras ou má formação de microbolhas no flotador. Se o problema ainda persistir, solicitar ao Assistente de Laboratório a realização de "Ensaio de Jar Test";
- Caso o efluente tratado não esteja visualmente de boa qualidade, verificar com o Assistente de Laboratório os resultados das análises e realizar as possíveis correções no sistema de flotação;
- Caso aconteça algum problema mecânico ou elétrico no sistema do flotador, solicitar imediatamente

ao setor de manutenção ação corretiva;

- Tomar sempre todas as precauções possíveis para obter um efluente tratado de qualidade e que atenda aos padrões estabelecidos pela legislação ambiental.

8. REGISTROS

Nome do Registro	Tipo do Arquivo	Tipo de Acesso	Forma de Indexação	Tempo mínimo de retenção	Local de Arquivamento	Responsável pela guarda do Registro	Descarte
-	Eletrônico	Restrito	-	-	-	Analista	Delete

9. REFERÊNCIAS

CASTELO BRANCO, P. H. A. **Avaliação da Flotação por Ar Dissolvido no Pós-Tratamento de Águas Residuárias de Frigorífico Avícola**. Dissertação de Mestrado. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), 2026.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Lagoas de Estabilização**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2017.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 7. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017.

NUNES, J. A. **Tratamento Físico-Químico de Águas Residuárias Industriais**. 6. ed. Aracaju: J. Andrade, 2012.

DEL NERY, V. et al. **Poultry slaughterhouse wastewater treatment plant for high quality effluent. Water Science and Technology**, v. 75, n. 4, p. 912-921, 2016.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes.**

DocuSign Envelope ID: 6726171B-614C-4CE0-8432-9BE6727F85FF

ANEXO VIII - MODELO DE CARTA DE INTENÇÃO DE PARCERIA

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA MINAS GERAIS Campus Bambuí

Pelo presente Termo de Parceria, a empresa **Avivar Alimentos S/A, situada no endereço: Povoado de Teixeiras S/N, Sit. Teixeiras, Zona Rural, na cidade de São Sebastião do Oeste, CEP 35567-000, CNPJ nº 42.816.108/0001-05**, declara colaborar na execução do **pré-projeto do discente Paulo Henrique Alves Castelo Branco**, concorrente a uma vaga no "Curso de Pós-graduação Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental", do Campus Bambuí, em Bambuí (MG).

Nome do Pré-projeto apresentado no Processo Seletivo do MPSTA 2024.2

Análise do sistema de flotação por ar dissolvido como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbicos e aeróbicos na indústria de abate e processamento de aves: Estudo de caso

Cidade na qual será realizada a execução do Pré-projeto

São Sebastião do Oeste – MG

Atividade(s) na empresa/órgão: **Realização de coleta de amostras na estação de tratamento e no sistema FAD, testes de bancada e análises em laboratório. Será utilizada a estrutura do laboratório existente na empresa, bem como todos os equipamentos e utensílios necessários para os testes e análises.**

Suporte da empresa/órgão na execução do Pré-projeto (marque as opções):

(**x**) infraestrutura disponível – valores estimados a R$ 0.0

(**x**) quadro de funcionários – valores estimados a R$0.0

( ) recursos financeiros – valor estimados a R$ 0.0

( ) outros suportes (descrever) – valores estimados a R$ 0.0

Totais de recursos financeiros estimados na parceria: R$ 0.0

Contrapartida do discente para a empresa/órgão referente ao desenvolvimento do pré-projeto:

DocuSign Envelope ID: 6726171B-614C-4CE0-8432-9BE6727F85FF

1) **Apresentar os resultados do estudo e da viabilidade operacional e econômica do sistema de Flotação por Ar Dissolvido (FAD)** - valores estimados a R$ 0.0

2) **Propor novas medidas ou adaptações necessárias no sistema atual, visando melhorar a sustentabilidade na gestão dos efluentes tratados na indústria.** - Valores estimados a R$ 0.0

3) **Elaborar um Procedimento Operacional Padrão (POP) com o fluxo de processos detalhado no sistema FAD, incluindo a aplicação dos químicos e os ajustes operacionais necessários.** - Valores estimados a R$ 0.0

Totais de recursos financeiros estimados na contrapartida: R$ 0.0

Em: 24 / 06 / 2024

DocuSigned by:
Paulo Henrique Alves Castelo Branco
D7902400678B94BA...

Nome e assinatura do candidato

Eu, **José Jeronimo Eloi Junior**, representante da empresa **Avivar Alimentos S/A**, **CNPJ. 42.816.108/0001-05** declaro haver interesse desta empresa em contribuir com o desenvolvimento do Projeto do discente **Paulo Henrique Alves Castelo Branco** Sendo assim, fica firmado o compromisso da empresa nos seguintes pontos:

1- **Disponibilização da infraestrutura existente na estação de tratamento de efluentes (ETE) e no laboratório, bem como de materiais e reagentes para realização de testes de bancada, análises e levantamento de dados.**

2- **Disponibilização de um funcionário/assistente de ETE para auxiliar nos testes, análises e coletas em campo.**

3- **Disponibilização de acesso aos projetos do sistema de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) e ao histórico de resultados das análises internas e externas para apuração dos dados.**

Em: 27 / 06 / 2024.

DocuSigned by:
Jose Jeronimo Eloi Junior
5CB76EC07CB94C5...

42816108/0001-05
I.E. 646.991109.0007
AVIVAR ALIMENTOS LTDA
Povoado de Teixeira, S/Nº
Zona Rural - CEP 35567-000
São Sebastião do Oeste - MG

Assinatura e carimbo da empresa parceira

DocuSign

Certificado de Conclusão

Identificação de envelope: 6726171B614C4CE084329BE6727F85FF
Status: Concluído
Assunto: Complete com o Docusign: Anexo_VIII_-_Termo_de_Parceria - Avivar e Paulo.docx
Envelope fonte:
Documentar páginas: 2
Certificar páginas: 5
Assinatura guiada: Ativado
Selo com EnvelopeId (ID do envelope): Ativado
Fuso horário: (UTC-03:00) Brasília
Assinaturas: 2
Rubrica: 0

Remetente do envelope:
Janay Santana Oliveira
Povoado dos Teixeiras, s/nº Zona Rural
SAO SEBASTIAO DO OESTE, MG 35.567-000
janay.oliveira@avivar.com.br
Endereço IP: 177.84.21.130

Rastreamento de registros

Status: Original
24/06/2024 14:58:32
Portador: Janay Santana Oliveira
janay.oliveira@avivar.com.br
Local: DocuSign

Eventos do signatário	Assinatura	Registro de hora e data
Paulo Henrique Alves Castelo Branco paulo.branco@avivar.com.br Nível de segurança: E-mail, Autenticação da conta (Nenhuma)	DocuSigned by: Paulo Henrique Alves Castelo Branco D790240067B94BA... Adoção de assinatura: Estilo pré-selecionado Usando endereço IP: 177.84.21.130	Enviado: 24/06/2024 15:00:22 Visualizado: 24/06/2024 15:00:52 Assinado: 24/06/2024 15:01:17
Termos de Assinatura e Registro Eletrônico: Aceito: 21/12/2023 11:42:12 ID: 480d107e-4b94-424e-a819-cdcc15098939		
Jose Jeronimo Eloi Junior jose.junior@avivar.com.br Nível de segurança: E-mail, Autenticação da conta (Nenhuma)	DocuSigned by: Jose Jeronimo Eloi Junior 5CB76EC97CB94C5... Adoção de assinatura: Estilo pré-selecionado Usando endereço IP: 177.26.251.57 Assinado com o uso do celular	Enviado: 24/06/2024 15:01:18 Visualizado: 26/06/2024 08:22:24 Assinado: 27/06/2024 10:21:49
Termos de Assinatura e Registro Eletrônico: Aceito: 12/01/2023 13:48:32 ID: 9f33431c-538f-42a2-9016-61f2ccfbab31		

Eventos do signatário presencial	**Assinatura**	**Registro de hora e data**
Eventos de entrega do editor	**Status**	**Registro de hora e data**
Evento de entrega do agente	**Status**	**Registro de hora e data**
Eventos de entrega intermediários	**Status**	**Registro de hora e data**
Eventos de entrega certificados	**Status**	**Registro de hora e data**
Eventos de cópia	**Status**	**Registro de hora e data**
Eventos com testemunhas	**Assinatura**	**Registro de hora e data**
Eventos do tabelião	**Assinatura**	**Registro de hora e data**
Eventos de resumo do envelope	**Status**	**Carimbo de data/hora**
Envelope enviado	Com hash/criptografado	24/06/2024 15:00:22
Entrega certificada	Segurança verificada	26/06/2024 08:22:24