



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

BRENDA NUNES DE AGUIAR

**ANÁLISE DE DIMENSIONAMENTO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE EFLuentes DE UMA INDUSTRIA DE AVICULTURA.**

**FORTALEZA
2025**

BRENDA NUNES DE AGUIAR

ANÁLISE DE DIMENSIONAMENTO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE EFLUENTES DE UMA INDUSTRIA DE AVICULTURA.

Trabalho de Conclusão de Curso
referente ao curso de Graduação em
Engenharia Ambiental do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial para
a obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof.^º Dr. Jose
Carlos Alves Barroso Junior

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Federal do Ceará

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A227a Aguiar, Brenda Nunes de.

Análise de dimensionamento de estação de tratamento de efluentes de uma indústria de avicultura / Brenda Nunes de Aguiar. – 2025.

109 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2025.

Orientação: Prof. Dr. José Carlos Alves Barroso Júnior.

Coorientação: Prof. Dr. Antônio Ricardo Mendes Barros.

1. Iodos ativados. 2. Dimensionamento. 3. Tratamento biológico e físico-químico. 4. Efluente industrial. 5. Avicultura. I. Título.

CDD 628

BRENDA NUNES DE AGUIAR

**ANÁLISE DE DIMENSIONAMENTO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO
DE EFLUENTES DE UMA INDUSTRIA DE AVICULTURA.**

Trabalho de Conclusão de Curso
referente ao curso de Graduação em
Engenharia Ambiental do Centro de
Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial para
a obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Ambiental.

APROVADO EM: 10/03/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos Alves Barroso Junior (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Dayane de Andrade Lima
Universidade Federal do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Antônio Ricardo mendes Barros (coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFPA)

A Deus, meus guias, anjos e
santos.

A mim por não ter desistido.

Aos meus familiares.

Aos meus amigos.

À minha Mãe.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha mais profunda gratidão à minha Mãe Antônia, que sempre esteve ao meu lado em cada etapa da minha jornada. Seu amor incondicional, apoio incansável e sábios conselhos foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Nos momentos de dúvida, foi sua força que me impulsionou a seguir em frente, e nas conquistas, foi sua alegria que tornou tudo ainda mais especial. Este trabalho é também reflexo de tudo o que aprendi com você, e por isso, dedico a você meu mais sincero agradecimento.

Agradeço imensamente aos meus irmãos Bruno e Beatriz, ao meu pai Abelardo e à minha família pelo apoio incondicional ao longo dessa jornada. Cada palavra de incentivo, cada gesto de carinho e cada momento compartilhado foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Nos desafios, encontrei em vocês força e motivação para seguir em frente, e nas conquistas, a felicidade foi ainda maior por poder dividi-las com vocês. Sou grato por ter ao meu lado uma família que acredita em mim e me inspira todos os dias.

Com imenso carinho e gratidão, dedico este agradecimento à minha tia/mãe Maria, que sempre esteve presente em minha vida como um verdadeiro exemplo de amor, dedicação e generosidade. Sua presença foi essencial em minha caminhada, oferecendo apoio nos momentos difíceis e celebrando comigo cada conquista. Suas palavras de incentivo e seu coração acolhedor fizeram toda a diferença, tornando o caminho mais leve e significativo. Sou profundamente grato por todo o amor e ensinamentos que recebi de você. Obrigado por tudo!

Aos meus amigos Jully Anne, Vitória Vaes, Andressa Sena, Conceição, Douglas Moura, Francisco de Assis, Rodrigo Lima, Davi Belezia minha mais sincera gratidão por cada palavra de incentivo, por cada momento de descontração e por todo apoio ao longo dessa caminhada. A amizade de vocês foi essencial para tornar os desafios mais leves e as conquistas ainda mais especiais. Nos momentos de incerteza, encontrei em vocês motivação para seguir em frente, e nas horas de alegria, tive a felicidade de compartilhar cada vitória ao lado de pessoas tão incríveis. Obrigado por estarem sempre comigo!

Aos meus amigos de trabalho/vida, Maria de Lourdes, Gabriel, Ícaro, Lucas, Fábio, Tiago, Carlos Eduardo expresso minha profunda gratidão pelo apoio, companheirismo e aprendizado compartilhado ao longo dessa jornada. O ambiente de trabalho se tornou muito mais leve e enriquecedor graças à colaboração e troca de experiências que tivemos. Cada conversa, incentivo e gesto de amizade foram fundamentais para meu crescimento profissional e pessoal. Agradeço por estarem ao meu lado, tornando os desafios mais fáceis de enfrentar e as conquistas ainda mais gratificantes.

Ao meu orientador, Dr. José Carlos, minha sincera gratidão por sua amizade, apoio, paciência e compreensão ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Por me incentivar a seguir em frente e tornar essa jornada mais leve, meu muito obrigado.

Ao meu coorientador, Dr Ricardo Mendes, agradeço imensamente pelo suporte, dedicação e valiosas contribuições ao longo deste trabalho. Sua orientação e disponibilidade foram essenciais para meu crescimento acadêmico e para a realização deste estudo. Meu sincero reconhecimento por todo o auxílio e incentivo.

À Dra. Dayane de Andrade, membro da minha banca avaliada, expressou minha sincera gratidão pela disponibilidade e pelo apoio.

Ao futuro Dr. Danylo Andrade, meu amigo, expresso minha profunda gratidão pelo apoio incondicional, pelas palavras de incentivo e pela amizade ao longo desta jornada. Sua presença foi essencial, tornando os desafios mais leves e a caminhada mais motivadora. Obrigado por estar sempre ao meu lado.

Ao corpo docente do curso de Engenharia Ambiental, que fez parte da minha formação e me auxiliou durante todos esses anos.

A mim, dedico este agradecimento pelo esforço, pela resiliência e por não desistir diante dos desafios. Cada esforço, cada aprendizado e cada superação ao longo desta jornada foram fundamentais para a concretização deste trabalho. Que esta conquista seja apenas mais um passo rumo a novos desafios e realizações.

Por fim, à Universidade Federal do Ceará, por todas as oportunidades de aprendizado que me foram proporcionadas.

*O correr da vida embrulha tudo,
a vida é assim: esquenta e
esfria, aperta e daí afrouxa,
sossega e depois desinquieta.
O que ela quer da gente é
coragem". (João Guimarães
Rosa -Grande Sertão Veredas).*

RESUMO

A indústria avícola gera grandes volumes de efluentes com elevada carga orgânica, óleos e graxas, sólidos suspensos e nutrientes como nitrogênio e fósforo. O tratamento adequado desses efluentes é essencial para minimizar impactos ambientais e atender às legislações vigentes. Este trabalho apresenta um estudo detalhado do tratamento de efluentes da indústria avícola, com base em um sistema de tratamento composto pelas etapas de pré-tratamento, tratamento primário, secundário e terciário. Inicialmente, o efluente bruto passa pelo gradeamento, onde materiais grosseiros são removidos, seguido pela desarenação, que retira sólidos sedimentáveis. A medição de vazão por calha Parshall é realizada para monitoramento do fluxo, antes da passagem pela caixa de gordura, que reduz a presença de óleos e graxas. No tanque de equalização, ocorre a homogeneização do efluente, garantindo um fluxo uniforme ao longo do processo. O tratamento primário consiste no decantador primário, que promove a remoção de sólidos sedimentáveis. No reator aeróbio, microrganismos degradam a matéria orgânica, resultando na redução da carga poluente. O decantador secundário separa os sólidos biológicos do efluente tratado, direcionando parte do lodo para descarte como lodo químico. O tratamento terciário inclui um processo de flocação e decantação, seguido pela filtração em filtros de areia e antracito e carvão ativado, garantindo a remoção de sólidos remanescentes e poluentes dissolvidos. Por fim, o efluente passa por um tanque de cloração, onde a desinfecção ocorre antes do descarte final, atendendo aos padrões ambientais. Os resultados demonstram a eficiência do sistema no tratamento dos efluentes avícolas, garantindo a remoção eficiente de contaminantes e possibilitando o reuso da água tratada ou seu descarte seguro no meio ambiente. Conclui-se que o tratamento aplicado é uma solução viável para a sustentabilidade da indústria avícola, reduzindo impactos ambientais e otimizando a gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: Tratamento de efluentes; indústria avícola; sustentabilidade; lodos ativados; dimensionamento.

ABSTRACT

The poultry industry generates large volumes of wastewater with high organic load, oils and greases, suspended solids, and nutrients such as nitrogen and phosphorus. Proper treatment of this wastewater is essential to minimize environmental impacts and comply with current regulations. This study provides a detailed analysis of poultry industry wastewater treatment, based on a treatment system composed of pre-treatment, primary, secondary, and tertiary treatment stages. Initially, the raw effluent undergoes screening, where coarse materials are removed, followed by grit removal, which eliminates settleable solids. Flow measurement using a Parshall flume is conducted for monitoring before passing through a grease trap, which reduces the presence of oils and greases. In the equalization tank, the effluent is homogenized, ensuring a uniform flow throughout the process. The primary treatment consists of a primary clarifier, which promotes the removal of settleable solids. In the aerobic reactor, microorganisms degrade organic matter, reducing pollutant load. The secondary clarifier separates biological solids from the treated effluent, directing part of the sludge for disposal as chemical sludge. The tertiary treatment includes a flocculation and sedimentation process, followed by filtration through sand and anthracite filters and activated carbon, ensuring the removal of remaining solids and dissolved pollutants. Finally, the effluent passes through a chlorination tank, where disinfection occurs before final discharge, meeting environmental standards. The results demonstrate the efficiency of the system in treating poultry wastewater, ensuring effective removal of contaminants and enabling either the reuse of treated water or its safe disposal into the environment. It is concluded that the applied treatment is a viable solution for the sustainability of the poultry industry, reducing environmental impacts and optimizing water resource management.

Keywords: Effluent treatment; poultry industry; Sustainability; activated sludge; sizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma de tratamento preliminar	15
Figura 2 - Funcionamento de um reator UASB	22
Figura 3 -Rotas Metabólicas.....	24
Figura 4 -Fluxograma Típico do Sistema de Lodos Ativados Convencional. ...	25
Figura 5 - Filtro prensa industrial.....	33
Figura 6 - Espectro ultravioleta.....	36
Figura 7- Fluxograma de processo.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 8 - Informações da Calha Parshall.....	55
Figura 9 - Garganta da Calha Parshall.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais Níveis de Tratamento de Esgotos.....	13
Tabela 2 - Características dos principais níveis de tratamento dos esgotos....	13
Tabela 3 - Tabela de Processos de Tratamento Biológico.....	18
Tabela 4 - Dados do Efluente Bruto.	42
Tabela 5- Parâmetros de qualidade de água do efluente pós ensaio de tratabilidade em laboratório.....	43
Tabela 6 - Verificação das Velocidades	49
Tabela 7 - Tabela de verificação	52
Tabela 8 - Eficiências de remoção no decantador primário	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CO ₂	Dióxido de Carbono
COEMA	Conselho de Meio Ambiente do Estado do Ceará
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
CT	Coliformes Termotolerantes
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DBO ₅	Demanda Bioquímica de Oxigênio (medida a 5 dias, 20°C)
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
LDNSB	Lei e Diretrizes Nacionais de Saneamento Básico
NBR	Norma Brasileira
NMP	Número Mais Provável
OMS	Organização Mundial da Saúde
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SNISA	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SST	Sólidos Suspensos Totais
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UFC	Universidade Federal do Ceará

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	4
2.	OBJETIVOS	6
2.1.	OBJETIVO GERAL	6
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
3.1.	Efluentes Industriais.....	7
3.2.	Avicultura	8
3.3.	Legislação Ambiental Pertinente.....	9
3.4.	Caracterização do Efluente.....	11
3.5.	Tratamento de efluentes provenientes da avicultura.....	12
3.6.	Tratamento Preliminar	15
3.6.1.	Gradeamento e Peneiramento.....	15
3.6.2.	Desarenação.....	15
3.6.3.	Caixa Separadora de Gordura.....	16
3.6.4.	Tanque de Equalização	16
3.7.	Tratamento Primário	16
3.7.1.	Flotação	17
3.7.2.	Decantação	17
3.8.	Tratamento Secundário	18
3.8.1.	Lagoas de Estabilização	20
3.8.2.	Reatores anaeróbios de manta de lodo	22
3.8.3.	Lodos ativados convencional	25
3.9.	Tratamento Físico-químico	26
3.9.1.	Coagulação	26
3.9.1.1.	Coagulantes.....	27
3.9.1.1.1.	Sulfato de Alumínio	27
3.9.1.1.2.	Cloreto Férrico.....	28
3.9.1.1.3.	Policloreto de Alumínio	29

3.9.2.	Flocação	29
3.9.2.1.	Polímeros Utilizados como Floculantes	30
3.10.	Gerenciamento de Lodo.....	31
3.10.1.	Leitos de Secagem	31
3.10.2.	Centrifugas de Lodo	31
3.10.3.	Filtro Prensa.....	32
3.11.	Tratamento Terciário	33
3.11.1.	Filtração	33
3.11.2.	Desinfecção.....	34
3.11.2.1.	Cloro	35
3.11.2.2.	Ozônio	35
3.11.2.3.	Radiação Ultravioleta	36
4.	METODOLOGIA	37
4.1.	Classificação da Metodologia.....	37
4.2.	Caracterização do local de estudo	37
4.3.	Caracterização do efluente	37
4.3.1.	Alta carga orgânica	38
4.3.2.	Nutrientes	38
4.3.3.	Presença de microrganismos patogênicos	38
4.3.4.	Óleos e graxas	38
4.3.5.	pH variável	38
4.3.6.	Outros contaminantes	38
5.	RESULTADOS.....	42
5.1.	Caracterização do Efluente.....	42
5.2.	Dimensionamento.....	44
5.2.1.	Determinação da Vazão.....	44
5.2.2.	Tratamento Preliminar	46
5.2.2.1.	Dimensionamento das Grades	46
5.2.2.2.	Dimensionamento do Canal de Desarenação	50

5.2.2.3.	Calha Parshall	54
5.2.2.4.	Caixa Separadora de Gordura.....	59
5.2.2.5.	Tanque de Equalização	60
5.2.3.	Tratamento Primário	63
5.2.3.1.	Decantador Primário	63
5.2.3.2.	Reator Aeróbio	66
5.2.3.3.	Decantador Secundário	75
5.2.3.4.	Coagulação.....	78
5.2.3.4.1.	Volume do Tanque	78
5.2.3.4.2.	Dimensões	78
5.2.3.4.3.	Potência do Misturador	79
5.2.3.5.	Flocação Mecânica.....	79
5.2.3.5.1.	Volume do tanque.....	79
5.2.3.5.2.	Dimensões do tanque	80
5.2.3.5.3.	Potência do floculador.....	80
5.2.3.6.	Decantador	81
5.2.3.6.1.	Volume do Decantador	81
5.2.3.6.2.	Área requerida.....	81
5.2.3.6.3.	Diâmetro do Decantador.....	82
5.2.3.6.4.	Profundidade do reator	82
5.2.3.7.	Filtração.....	83
5.2.3.8.	Desinfecção	84
5.2.3.9.	Desaguamento de Lodo	85
5.2.4.	Avaliação da Eficiência do Sistema Proposto	86
6.	CONCLUSÃO	91
	REFERÊNCIAS	92
	ANEXOS	99

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por produtos de origem avícola tem impulsionado significativamente a indústria da avicultura no Brasil e no mundo. Esse setor produtivo desempenha um papel crucial na economia, sendo responsável pela geração de empregos, movimentação de mercados e fornecimento de proteína animal acessível para diversas populações. No entanto, o crescimento dessa atividade também resulta em impactos ambientais consideráveis, principalmente relacionados à geração e descarte de efluentes industriais.

Os efluentes provenientes da indústria avícola são compostos por uma mistura complexa de resíduos orgânicos, gorduras, proteínas, sangue, penas, fezes e produtos químicos utilizados nos processos de higienização e manutenção das instalações (Matos et al., 2018). Essas substâncias, quando descartadas sem tratamento adequado, podem causar poluição dos corpos hídricos, promovendo a eutrofização, o comprometimento da qualidade da água e a proliferação de microrganismos patogênicos (Silva et al., 2020). Dessa forma, torna-se essencial a adoção de tecnologias eficazes para o tratamento desses efluentes, garantindo a preservação ambiental e o cumprimento das normas regulamentadoras.

Atualmente, diversas metodologias são empregadas para o tratamento de efluentes avícolas, incluindo processos físico-químicos, biológicos e avançados. Entre os principais métodos, destacam-se a coagulação-flocação, a digestão anaeróbia, os sistemas de lagoas de estabilização e os reatores biológicos aeróbios e anaeróbios (Santos & Oliveira, 2021). A escolha do tratamento mais adequado depende da carga poluente, das características físico-químicas do efluente e das exigências normativas vigentes.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2011) estabelece diretrizes e padrões para o lançamento de efluentes industriais em corpos d'água, visando minimizar os impactos ambientais decorrentes dessas atividades (Brasil, 2011). Dessa forma, a adoção de sistemas de tratamento eficientes não apenas atende às exigências legais, mas também promove a sustentabilidade do setor avícola, reduzindo os impactos ambientais e contribuindo para a economia circular e o reaproveitamento de subprodutos (Carneiro et al., 2019).

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar as principais tecnologias de tratamento de efluentes provenientes da indústria de avicultura, destacando suas eficiências, desafios e aplicações práticas. Além disso, busca-se discutir a viabilidade técnico-econômica dessas soluções, avaliando seu impacto ambiental e a conformidade com as regulamentações ambientais.

A relevância deste estudo reside na necessidade urgente de aprimorar os sistemas de tratamento de efluentes na indústria avícola, garantindo que essa atividade continue a crescer de maneira sustentável e em harmonia com a preservação dos recursos hídricos. Dessa forma, espera-se que este trabalho contribua para a disseminação de conhecimento técnico e científico sobre o tema, auxiliando na tomada de decisões estratégicas para o setor.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolver e analisar o dimensionamento de uma estação de tratamento de efluentes (ETE) para a indústria da Avicultura, com foco na eficiência dos processos utilizados e no atendimento às normas ambientais vigentes.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Caracterização do efluente;
- II. Concepção do sistema de tratamento para remoção de matéria orgânica, nutrientes e organismos patogênicos;
- III. Dimensionamento do sistema proposto para o tratamento, utilizando a tecnologia de Lodos Ativados combinado com físico-químico, seguido por desinfecção.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Efluentes Industriais

Segundo o Fundo de Nações Unidas para a Agricultura e Alimentos - FAO a agricultura é o setor responsável por 72% do consumo de água no Brasil. A produção de mercadorias para abastecer a crescente sociedade de consumo cada vez mais urbana, tem provocado uma tensão ambiental entre o ritmo natural de reposição da água e o desenvolvimento da sociedade consumista de bens materiais. O autor afirma que “não haverá água suficiente para abastecer a sociedade de consumo capitalista”.

Para Ribeiro (2008), os maiores consumidores de água no mundo são os sistemas produtivos industriais e agrícolas. Países de renda elevada utilizam quase 60% da água na indústria e 30% na agricultura, já os países de renda média e baixa utilizam uma parcela correspondente a 10% na indústria e 82% na agricultura.

A indústria pode utilizar a água de diversas maneiras, como incorporá-la ao produto, lavar máquinas, tubulações e pisos, utilizar água dos sistemas de resfriamento e geradores de vapor, além de utilizar água diretamente nas etapas de processamento industrial ou como parte dos esgotos sanitários dos funcionários. Entretanto, com exceção do volume de água incorporado aos produtos e perdas por evaporação, as águas utilizadas acabam ficando contaminadas por resíduos do processo industrial ou por perdas de energia térmica, o que gera os efluentes líquidos (GHANDI, 2005).

De acordo com a norma brasileira da ABNT – NBR 9800/1987, efluentes industriais são despejos líquidos provenientes de áreas de processamento industrial, incluindo os originados nos processos de produção, as águas de lavagem de operação de limpeza e outras fontes, que comprovadamente apresentem poluição por produtos utilizados ou produzidos no estabelecimento industrial (BRASIL, 2022).

Segundo Medcalf e Eddy (2002), esgoto é essencialmente a água de abastecimento de uma comunidade após o seu uso em uma variedade de aplicações, contendo constituintes que, sem o devido tratamento, a tornam imprópria para a maioria dos usos. Os poluentes contidos nos efluentes

líquidos que são descartados causam mudanças na qualidade dos corpos receptores e, consequentemente, sua poluição ou degradação.

Ao longo da história, o desenvolvimento urbano e industrial ocorreu ao longo dos rios, principalmente devido à disponibilidade de água para abastecimento e a possibilidade de utilizar o rio como corpo receptor dos dejetos. No entanto, é preocupante observar o aumento das populações como das atividades industriais, bem como o número de vezes em que um mesmo corpo d'água recebe dejetos urbanos e industriais (Cavalcanti, 2016). Um exemplo desses efluentes existentes e poluidores é o proveniente da avicultura.

Segundo Cotta (2003), a avicultura possui um processo de produção intensivo, ou seja, um grande volume de carne de frango em um espaço reduzido, em um menor tempo possível, gerando resíduos diversos. A intervenção das atividades de avicultura no meio ambiente é responsável pela geração de resíduos diversos, muitas vezes responsáveis pela descaracterização da paisagem, alteração da cobertura vegetal e outros efeitos ambientais adversos relacionados aos meios físico, biótica e antrópico (MONTEIRO, 2009).

3.2. Avicultura

A avicultura é uma das principais cadeias produtivas do setor agropecuário, contribuindo significativamente para a economia e segurança alimentar em diversos países (SILVA et al., 2022). A produção de carne de frango é de grande importância para a economia brasileira, sendo esse produto o terceiro mais exportado no setor do agronegócio e representa cerca de 45% do mercado internacional de carnes. O Brasil é líder na exportação mundial de carne de frango desde 2004 e detém, hoje, 35% desse mercado. Só no ano passado, o país produziu 14,3 milhões de toneladas de carne de frango. Deste total, 32% foram exportados para mais de 150 nações, gerando uma receita de US\$ 7,6 bilhões (Brasil, 2022).

No entanto, além dos benefícios econômicos, essa atividade gera uma expressiva quantidade de resíduos líquidos e sólidos, conhecidos como efluentes, que podem causar sérios impactos ambientais se não tratados especificamente (OLIVEIRA e SANTOS, 2021).

Segundo FORESTI et al. (1978), um aumento da produção de frangos, por si só, acarreta aumento geral do volume de despejos líquidos resultantes do processo de industrialização e, consequentemente, no aumento geral dos problemas de poluição ocasionados por esse tipo de despejo. A possibilidade de instalação de abatedouros de alta capacidade através de desenvolvimento tecnológico agrava esses problemas, já que concentra o lançamento de grandes volumes de despejos.

Para o abate de aves são gerados em média de 10 a 50 litros de água por ave, atingindo uma média de 15 litros por animal abatido. Essa água é utilizada nas lavagens de pisos e das instalações e nas seguintes etapas da produção: área de recebimentos das aves; lavagens das caixas utilizadas no transporte; sala de abate; sala de sangria; escaldamento; depenagem mecanizada; evisceração; resfriamento com gelo; embalagem; congelamento e expedição. Também são gerados efluentes nas lavagens dos frangos e caminhões de transporte dos animais. Portanto o abate e higienização dos equipamentos são as etapas de maior consumo de água, responsáveis pela maior parte das águas residuárias geradas. (AMORIM et al. 2007).

De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA, 2023), a poluição gerada por efluentes não tratados é uma das principais causas de eliminação dos recursos hídricos no Brasil.

3.3. Legislação Ambiental Pertinente

- Legislação Federal

Lei nº 9.433/1997 – Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).

Lei nº 11.445/2007 – Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, incluindo o tratamento de efluentes.

Lei nº 12.305/2010 – Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que também impacta o gerenciamento de lodos e resíduos gerados no tratamento de efluentes.

Decreto nº 7.217/2010 – Regulamenta a Lei nº 11.445/2007 e detalha aspectos operacionais do saneamento básico.

Resoluções do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente)

Resolução CONAMA nº 357/2005 – Estabelece a classificação dos corpos d'água e os padrões de qualidade para o seu enquadramento.

Resolução CONAMA nº 430/2011 – Complementa a Resolução nº 357/2005 e dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes.

Resolução CONAMA nº 396/2008 – Define padrões de qualidade para as águas subterrâneas.

Resolução CONAMA nº 274/2000 – Define os critérios para a balneabilidade das águas e a disposição de efluentes em corpos hídricos.

Resoluções do COEMA (Conselho Estadual do Meio Ambiente)

Resolução COEMA nº 2, de 2 de fevereiro de 2017: Dispõe sobre padrões e condições para o lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revogando portarias anteriores e atualizando critérios técnicos.

Resolução COEMA nº 9, de 5 de agosto de 2021: Estabelece condições e padrões específicos para o lançamento de efluentes na atividade de aquicultura no Ceará, visando minimizar impactos ambientais.

Resolução COEMA nº 12, de 15 de setembro de 2022: Define procedimentos e critérios para o licenciamento ambiental no saneamento rural, abrangendo atividades de esgotamento sanitário e abastecimento de água.

Normas Técnicas

NBR 9800/1987 – Define procedimentos para a coleta, preservação e análise de amostras de efluentes líquidos.

NBR 12209/2011 – Especifica critérios para projetos de estações de tratamento de esgoto sanitário.

NBR 13969/1997 – Define diretrizes para sistemas de tratamento de esgoto por disposição no solo.

NBR12216 DE 04/1992 - Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público

Outras Legislações Relacionadas

Lei nº 9.605/1998 – Lei de Crimes Ambientais, que estabelece penalidades para danos ambientais, incluindo o descarte inadequado de efluentes.

Portaria GM/MS nº 888/2021 – Atualiza os padrões de potabilidade da água para consumo humano.

3.4. Caracterização do Efluente

É bem conhecido que o efluente industrial de distribuidoras de frangos possui características específicas. Em trabalho realizado por Schultheisz e Karpati (1984), citados por JOHNS (1995), a quantidade de água utilizada por tonelada de peso corporal de ave abatida variou de 4200 até 16700 litros em abatedouros instalados nos Estados Unidos e de 5000 até 15000 litros por tonelada de peso corporal no Reino Unido. Já sob condições brasileiras a quantidade encontrada foi de 15 litros por carcaça ou 7500 litros por tonelada de ave abatida (SILVA, 2005).

Segundo JOHNS (1995), a composição do resíduo oriundo de abatedouros de aves pode oscilar entre 710 e 4.633 mg de O₂/litro de efluente para a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), 1.400 e 11.118 mg de O₂/litro de efluente para a demanda química de oxigênio (DQO) e 780 até 10.090 mg de O₂/litro de efluente para a DQO na fração em suspensão, respectivamente. O autor ainda compilou os resultados para os constituintes óleos e graxas, nitrogênio total (N), nitrogênio amoniacal, fósforo total (P) e alcalinidade, que variaram de 50 a 897; 110 a 700; 3 a 300; 13 a 120 e 350 a 800 mg/l de efluente, respectivamente.

Os efluentes provenientes de abatedouros de aves, quando não tratados, podem causar diversos problemas. Eles se tornam fontes de atração de insetos, agentes infeciosos e emissão de gases de efeito estufa. Além disso, também geram odores. Se esses efluentes forem descartados em corpos d'água, podem causar a eutrofização desses ambientes (BEUX, 2005). A eutrofização é um processo que se caracteriza pela diminuição do oxigênio reservado no meio ambiente e o crescimento excessivo de plantas aquáticas. Isso resulta em níveis elevados de nutrientes como nitrogênio (N) e fósforo (P), afetando a sobrevivência dos peixes e diminuição da biodiversidade.

Baseado nas características químicas, físicas e microbiológicas do efluente proveniente da avicultura, faz-se necessário o uso de tratamentos que possam causar a remoção ou diminuição da carga orgânica poluidora, juntamente com as concentrações de N, P e K.

3.5. Tratamento de efluentes provenientes da avicultura

O tratamento de efluentes industriais envolve processos necessários à remoção de impurezas geradas na fabricação de produtos de interesse. Os métodos de tratamento estão diretamente associados ao tipo de efluente gerado, ao controle operacional da indústria e às características da água utilizada (FREIRE et al., 2000).

Segundo SILVA et al., (2022), o tratamento de efluentes provenientes da avicultura é uma etapa essencial para a sustentabilidade ambiental da cadeia produtiva avícola. Esses efluentes possuem características particulares, como alta carga orgânica, elevada concentração de nutrientes (nitrogênio e fósforo), sólidos suspensos, gorduras e presença de patógenos, o que demanda soluções tecnológicas eficientes para seu tratamento adequado. De acordo com Oliveira e Santos (2021), o manejo inadequado desses efluentes pode causar contaminação de corpos hídricos, manipulação do solo e riscos à saúde pública, devido à presença de microrganismos patogênicos.

O processo de tratamento de efluentes avícolas geralmente envolve várias etapas, combinando processos físicos, químicos e biológicos (COSTA et al., 2023). Segundo Von Sperling, o tratamento de esgotos é usualmente classificado através de níveis. São eles: preliminar, primário, secundário e terciário (apenas eventualmente). O tratamento preliminar tem como objetivo apenas a remoção de sólidos grosseiros, enquanto o tratamento primário visa a remoção de sólidos sedimentáveis e, em decorrência, parte da matéria orgânica. Em ambos predominam os mecanismos físicos de remoção de poluentes.

Já no tratamento secundário, no qual predominam mecanismos biológicos, o objetivo principal é a remoção de matéria orgânica e eventualmente de nutrientes (nitrogênio e fósforo). O tratamento terciário objetiva a remoção de poluentes específicos (usualmente tóxicos ou compostos

não biodegradáveis) ou ainda, a remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário (VON SPERLING, 2005). O Tabela 1 apresenta os principais níveis de tratamento dos esgotos.

Tabela 1 - Principais Níveis de Tratamento de Esgotos

Nível	Remoção
Preliminar	<ul style="list-style-type: none"> Sólidos em suspensão grosseiros (matérias de dimensões maiores e areia)
Primário	<ul style="list-style-type: none"> Sólidos em suspensão sedimentáveis DBO em suspensão (associada à matéria orgânica componente dos sólidos em suspensão sedimentáveis)
Secundário	<ul style="list-style-type: none"> DBO em suspensão (caso não haja tratamento primário: DBO associada à matéria orgânica em suspensão, presente no esgoto bruto) DBO em suspensão finamente particulada (caso não haja tratamento primário: DBO associada à matéria orgânica em suspensão não sedimentável, não removida no tratamento primário) DBO solúvel (associada à matéria orgânica na forma de sólidos dissolvidos, presentes, tanto nos esgotos brutos, quanto no efluente do eventual tratamento primário, uma vez que os sólidos dissolvidos não são removidos por sedimentação)
Terciário	<ul style="list-style-type: none"> Nutrientes Orgânicos patogênicos Compostos não biodegradáveis Metais pesados Sólidos inorgânicos dissolvidos Sólidos em suspensão remanescentes
<ul style="list-style-type: none"> DBO em suspensão é também denominada DBO particulada; DBO solúvel pode ser considerada como equivalente à DBO filtrada. A remoção de nutrientes (por processos biológicos) e de organismos patogênicos pode ser considerada como integrante do tratamento secundário, dependendo do processo de tratamento adotado. 	

Fonte: Von Sperling (2014).

A Tabela 2 apresenta um resumo das principais características dos níveis de tratamento dos esgotos.

Tabela 2 - Características dos principais níveis de tratamento dos esgotos.

Item	Nível de tratamento (1)
------	-------------------------

	Preliminar	Primário	Secundário
Poluentes removidos	<ul style="list-style-type: none"> Sólidos grosseiros 	<ul style="list-style-type: none"> Sólidos sedimentáveis DBO em suspensão 	<ul style="list-style-type: none"> Sólidos não sedimentáveis DBO em suspensão fina DBO solúvel Nutrientes (parcialmente) Patogênicos (parcialmente)
Eficiências de remoção	-	<ul style="list-style-type: none"> SS: 60-70% DBO:30-40% Coliformes:30-40% 	<ul style="list-style-type: none"> DBO:60 a 99% Coliformes: 60 a 99% (3) Nutrientes:10 a 50% (3)
Mecanismo de tratamento	<ul style="list-style-type: none"> Físico 	<ul style="list-style-type: none"> Físico 	<ul style="list-style-type: none"> Biológico
Cumpre o padrão de lançamento? (2)	<ul style="list-style-type: none"> Não 	<ul style="list-style-type: none"> Não 	<ul style="list-style-type: none"> Usualmente sim
Aplicação	<ul style="list-style-type: none"> Montante de elevatória Etapa inicial de tratamento 	<ul style="list-style-type: none"> Tratamento parcial Etapa inicial de tratamento 	<ul style="list-style-type: none"> Tratamento mais completo para matéria orgânica e sólidos em suspensão (para nutrientes e coliformes, com adaptações ou inclusão de etapas específicas)

(1) Uma ETE a nível secundário usualmente tem tratamento preliminar, mas pode ou não ter tratamento primário (depende do processo).

(2) Padrão de lançamento tal como expresso na legislação. O órgão ambiente poderá autorizar outros valores para o lançamento, caso estudos ambientais demonstrem que o corpo receptor continuará enquadrado dentro da sua classe.

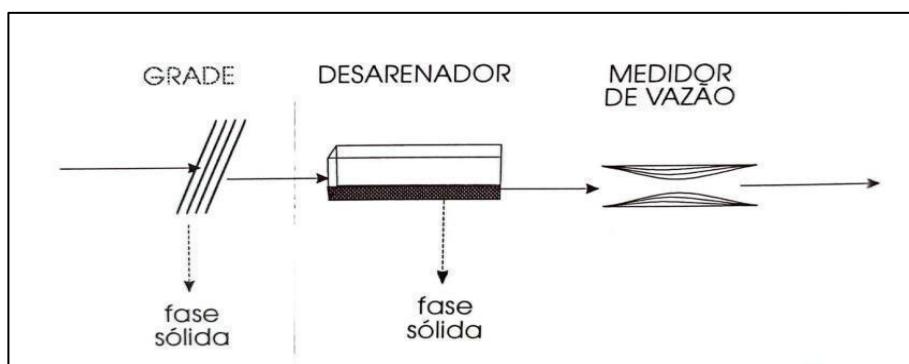
(3) A eficiência de remoção poderá ser superior, caso haja alguma etapa de remoção específica.

Fonte: Von Sperling (2014).

3.6. Tratamento Preliminar

A etapa inicial de tratamento em uma estação de tratamento de esgoto normalmente envolve o uso de grades de barras e desarenadores. O objetivo principal dessas unidades é remover sólidos que poderiam prejudicar o funcionamento adequado das etapas de tratamento subsequentes, principalmente devido a obstruções de tubulações e danos aos equipamentos eletromecânicos (VON SPERLING, 2014). A Figura 1 apresenta um fluxograma típico de tratamento preliminar.

Figura 1 - Fluxograma de tratamento preliminar



Fonte: Von Sperling (2014)

3.6.1. Gradeamento e Peneiramento

O gradeamento é o primeiro processo do tratamento preliminar, consistindo na remoção de sólidos grosseiros, como penas, resíduos de ração e outros materiais maiores (MENDES e ALMEIDA, 2020). Inicialmente o efluente bruto é desviado do atual canal de escoamento de efluente para o pré-tratamento no canal de gradeamento fino. Em seguida, submetido a peneiramento para retirada de materiais grosseiros de menor dimensão como penas de aves e vísceras.

3.6.2. Desarenação

A desarenação é responsável pela remoção de partículas inorgânicas pesadas, como areia, cascalho e fragmentos minerais presentes no efluente (ROCHA et al., 2023). O uso de desarenadores, que podem ser do tipo convencional, aerado ou hidrociclones, permite a separação dessas partículas por sedimentação ou força centrífuga (FERNANDES e SILVA, 2024).

O mecanismo de remoção da areia é simplesmente o de sedimentação: os grãos de areia, devido as suas maiores dimensões e densidade, vão para o

fundo do tanque, enquanto a matéria orgânica, sendo de sedimentação mais lenta, permanece em suspensão, seguindo para as unidades de jusante (VON SPERLING, 2014).

3.6.3. Caixa Separadora de Gordura

As caixas separadoras e gordura são unidades de tratamento preliminar com a finalidade de separar as substâncias mais leves que a água, como gorduras, graxas e óleo que podem ser removidas por separação por gravidade (remoção preliminar) ou por flotação (JORDÃO; PESSÔA, 2017). O tanque é dotado de defletores (chicanas) sob os quais a água passa geralmente de forma contínua (METCALF; EDDY, 2016).

3.6.4. Tanque de Equalização

Em estações de tratamento de efluentes industriais, pode ser necessária a instalação de tanque de equalização após o tratamento preliminar para minimizar a variação da vazão e facilitar a operação das unidades seguintes, devido à grande variação na vazão de entrada ao longo do dia. Os tanques de equalização têm por finalidade minimizar ou controlar as variações na vazão do efluente, homogeneizar a concentração do efluente, tornando uniformes: cor, turbidez, pH, temperatura, sólidos, DBO, DQO entre outros (LEME, 2010).

O tanque de equalização desempenha um papel fundamental no tratamento de efluentes provenientes da avicultura, sendo responsável por homogeneizar o fluxo e a composição do efluente antes de seu encaminhamento para as etapas subsequentes de tratamento (SILVA et al., 2022). A indústria avícola gera efluentes com grande variabilidade em termos de vazão, carga orgânica e presença de sólidos, especialmente na função das atividades de limpeza, processamento e manejo de resíduos (OLIVEIRA e SANTOS, 2021). Nesse contexto, o tanque de equalização atua como um regulador, garantindo maior eficiência nos processos de tratamento físico-químico e biológico.

3.7. Tratamento Primário

Depois de passarem pelas unidades de tratamento preliminar, os efluentes ainda contêm sólidos em suspensão não grosseiros, que podem ser parcialmente removidos em unidades de sedimentação, grande parte desses

sólidos em suspensão é composta por matéria orgânica. Ao remover essa matéria por meio de processos simples, como a sedimentação, a carga de DBO direcionada para o tratamento secundário é reduzida. A remoção da DBO no tratamento secundário é mais demorada do que a remoção por processos simples.

A eficiência de remoção de sólidos em suspensão no tratamento primário a partir de decantadores convencionais situa-se em torno de 60 a 70%, e de DBO em torno de 25 a 35% (VON SPERLING, 2014). O tratamento primário tem como principal objetivo remover os sólidos em suspensão sedimentáveis do efluente, incluindo sólidos graxas, óleos, flotáveis e decantáveis. Nesta etapa, operações físicas processos químicos e/ou físico-químicos são realizados, como correção de pH, flotação, precipitação química, decantação e coagulação/flocação. Os processos químicos removem metais pesados, óleos, material coloidal, cor, odor e turbidez. Já as operações físicas removem os sólidos sedimentáveis e uma parte da matéria orgânica.

3.7.1. Flotação

O processo de flotação atua, geralmente, nas interfaces água/ar e água/óleo (pouco utilizado) com o objetivo de realizar a separação entre os minerais de interesse. Diversas outras interfaces têm sido estudadas, como a interface água+álcool/ar e água/plástico na tentativa da descoberta de outras aplicações. Sendo assim, o sistema de interfaces origina o nome do processo de flotação. Os principais processos de flotação utilizados pela indústria mineral estão descritos a seguir (LEAL FILHO, 1995).

3.7.2. Decantação

A decantação também conhecida como sedimentação é um processo físico de separação de misturas heterogêneas, baseado na diferença de densidade. A decantação consiste em uma operação unitária bastante comum na remoção de partículas sólidas em um sistema de tratamento de água. Esse processo consiste em fazer a separação das partículas utilizando as forças gravitacionais (CARVALHO, 2008).

Durante o processo de decantação, o efluente bruto é direcionado para um tanque de decantação ou decantador, onde a velocidade do fluxo é reduzida, permitindo que as partículas sólidas sedimentem no fundo do tanque

(Metcalf & Eddy, 2016). O lodo sedimentado é então removido periodicamente, enquanto o efluente clarificado segue para as próximas etapas do tratamento (Von Sperling, 2005).

3.8. Tratamento Secundário

O tratamento secundário de efluentes tem como objetivo principal a remoção da matéria orgânica dissolvida e coloidal, que não foi eliminada no tratamento primário. Para isso, utiliza processos biológicos que utilizam microrganismos (bactérias, fungos e protozoários) na manipulação da matéria orgânica, transformando-a em biomassa, água e gases (Von Sperling, 2005).

Segundo Metcalf & Eddy (2016), os processos biológicos no tratamento de efluentes baseiam-se na utilização de microrganismos para remover matéria orgânica e, em alguns casos, nutrientes (nitrogênio e fósforo) presentes no esgoto. Esses processos podem ser divididos em dois grupos principais: processos aeróbios e processos anaeróbios.

Nos processos aeróbios, os microrganismos utilizam o oxigênio dissolvido para a manipulação da matéria orgânica. O objetivo principal é converter compostos orgânicos em biomassa microbiana, dióxido de carbono e água. Já nos processos anaeróbios, os microrganismos realizam a manipulação da matéria orgânica na ausência de oxigênio, gerando biogás principalmente metano e dióxido de carbono (Metcalf & Eddy, 2016). A Tabela 3 apresenta os principais processos de tratamento biológico utilizados no esgoto.

Tabela 3 - Tabela de Processos de Tratamento Biológico.

Tipo	Nome Comum	Uso
Processos aeróbios	• Lodos ativados	• Remoção da DBO carbonácea, nitrificação
Processos aeróbios	• Lagoas aeradas	• Remoção da DBO carbonácea, nitrificação
Processos aeróbios	• Digestão aeróbia	• Estabilização, remoção da DBO carbonácea
Processos aeróbios	• Biorreator de membranas	• Remoção da DBO carbonácea, nitrificação

Processos aeróbios	<ul style="list-style-type: none"> • Processos de nitrificação 	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrificação
Processos aeróbios	<ul style="list-style-type: none"> • Filtros biológicos aerados 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção da DBO carbonácea, nitrificação
Processos híbridos	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro biológico / lodo ativado 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção da DBO carbonácea, nitrificação
Processos híbridos	<ul style="list-style-type: none"> • Lodo ativado e filme fixo integrado (LAFFI) 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção da DBO carbonácea, nitrificação
Processos anóxicos	<ul style="list-style-type: none"> • Desnitrificação com crescimento suspenso 	<ul style="list-style-type: none"> • Desnitrificação
Processos anóxicos	<ul style="list-style-type: none"> • Filtro de desnitrificação com crescimento aderido 	<ul style="list-style-type: none"> • Desnitrificação
Processos anaeróbios	<ul style="list-style-type: none"> • Processos anaeróbios de contato 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção da DBO carbonácea
Processos anaeróbios	<ul style="list-style-type: none"> • Digestão anaeróbia 	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilização, destruição de sólidos, redução de patógenos
Processos anaeróbios	<ul style="list-style-type: none"> • Processo Anammox 	<ul style="list-style-type: none"> • Denitrificação, remoção de amônia
Processos anaeróbios	<ul style="list-style-type: none"> • Leito fluidizado fixo e anaeróbio 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção da DBO carbonácea, estabilização do esgoto, desnitrificação
Processos anaeróbios	<ul style="list-style-type: none"> • Reator anaeróbio de fluxo ascendente 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção da DBO carbonácea, principalmente de esgotos concentrados
Processos anaeróbios	<ul style="list-style-type: none"> • Reator de fluxo ascendente / crescimento aderido 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção da DBO carbonácea
Processos combinados	<ul style="list-style-type: none"> • Estágios múltiplos ou único (diversos processos patenteados) 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção da DBO carbonácea, nitrificação, desnitrificação, remoção de fósforo
Processos combinados	<ul style="list-style-type: none"> • Estágios múltiplos ou único de crescimento suspenso com leito fixo 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção da DBO carbonácea, nitrificação, desnitrificação, remoção de fósforo

Processos de lagoas	<ul style="list-style-type: none"> • Lagoas aeróbias 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção da DBO carbonácea, nitrificação
Processos de lagoas	<ul style="list-style-type: none"> • Lagoas de maturação (terciárias) 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção da DBO carbonácea, nitrificação
Processos de lagoas	<ul style="list-style-type: none"> • Lagoas facultativas 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção da DBO carbonácea
Processos de lagoas	<ul style="list-style-type: none"> • Lagoas anaeróbias 	<ul style="list-style-type: none"> • Remoção da DBO carbonácea (estabilização do esgoto)

Fonte: MedCalf & Eddy (2014)

3.8.1. Lagoas de Estabilização

As lagoas de estabilização são sistemas de tratamento biológico nos quais a estabilização da matéria orgânica ocorre por meio da oxidação bacteriana (aeróbia ou anaeróbia) e/ou pela redução fotossintética das algas (JORDÃO & PESSOA, 2017). Essas unidades possuem uma construção simples, mas demandam grandes áreas para sua implantação. Dentre os tipos de lagoas de estabilização, destacam-se as lagoas anaeróbias, facultativas e de maturação.

Lagoas facultativas: Segundo Von Sperling (1996), esse tipo de lagoa funciona de maneira essencialmente natural, sem necessidade de equipamentos adicionais. O esgoto afluente entra em uma extremidade e sai na outra, permanecendo na lagoa por vários dias. Durante esse tempo, a matéria orgânica suspensa tende a sedimentar, formando um lodo no fundo, que é degradado por microrganismos anaeróbios, resultando na produção de metano, água e gás carbônico. A fração dissolvida da matéria orgânica é decomposta por bactérias facultativas, que podem sobreviver com ou sem oxigênio. A oxigenação é promovida pela fotossíntese das algas, estabelecendo um equilíbrio entre consumo e produção de oxigênio. Apesar da eficiência satisfatória das lagoas facultativas, sua principal limitação é a grande área exigida para implantação. Para reduzir essa necessidade, pode-se utilizar lagoas anaeróbias, que são menores e mais profundas. Nelas, a fotossíntese ocorre em menor escala, levando a um consumo de oxigênio superior à produção. Embora as bactérias anaeróbias tenham menor taxa metabólica e de reprodução, a remoção da DBO pode atingir de 50% a 60%. No entanto, um problema comum é a liberação de gases como o sulfídrico, causador de odores

desagradáveis, razão pela qual essas lagoas são instaladas longe de áreas habitadas (VON SPERLING, 1996).

Lagoas anaeróbias: Nesses sistemas, a estabilização ocorre sem a presença de oxigênio dissolvido, por meio de processos de digestão ácida e fermentação mecânica (JORDÃO & PESSOA, 2017). São frequentemente utilizadas no tratamento de esgotos domésticos e efluentes industriais com alta carga orgânica (Von Sperling, 1996). A eficiência de remoção da DBO varia entre 50% e 60%, mas o efluente ainda apresenta carga orgânica elevada, exigindo tratamento complementar. Essas lagoas geralmente possuem profundidades entre 4 m e 5 m.

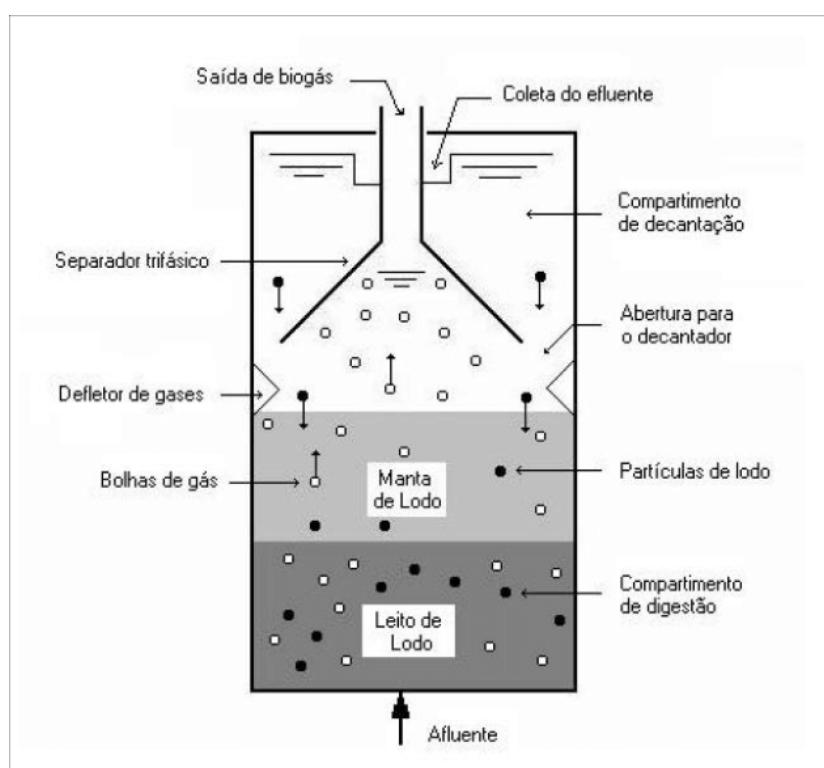
Lagoas aeradas: Esse tipo de lagoa integra a mecanização ao processo de estabilização, garantindo o suprimento de oxigênio por meio de dispositivos eletromecânicos. Dessa forma, a concentração de oxigênio dissolvido é mantida em toda ou parte da massa líquida, permitindo reações bioquímicas que caracterizam o tratamento (JORDÃO & PESSOA, 2017). Apesar de reduzirem a necessidade de grandes áreas, exigem maior nível de operação e consumo de energia elétrica, tornando-as menos simples em comparação com as lagoas facultativas convencionais (VON SPERLING, 1996).

Lagoas de maturação: Essas lagoas são utilizadas na etapa final de um sistema clássico de lagoas de estabilização, tendo como objetivo principal a melhoria da qualidade do efluente tratado, com foco na remoção de organismos patogênicos, especialmente coliformes fecais (JORDÃO & PESSOA, 2017). Além disso, os sistemas de lagoas podem atuar como unidades de pós-tratamento, conhecidas como lagoas de polimento, recebendo um efluente já clarificado e com carga orgânica reduzida. Seu principal papel não é a estabilização da matéria orgânica, mas sim a remoção de patógenos. Segundo Dias (2007), as lagoas de polimento foram inicialmente concebidas como lagoas facultativas. No entanto, observou-se que a sobrecarga orgânica na primeira lagoa da série poderia ser minimizada, permitindo que as lagoas de polimento fossem projetadas como lagoas de maturação, caracterizadas por menores profundidades e tempos de detenção hidráulica relativamente curtos.

3.8.2. Reatores anaeróbios de manta de lodo

Os reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manta de lodo, frequentemente denominados RAFA ou UASB, são sistemas nos quais a biomassa cresce dispersa no meio líquido e, à medida que se desenvolve, pode formar pequenos grânulos resultantes da aglutinação de diversas bactérias (VON SPERLING, 1996). A digestão anaeróbia nesses reatores pode ser considerada um ecossistema no qual diferentes grupos de microrganismos atuam em conjunto para converter matéria orgânica complexa em metano, dióxido de carbono, água, gás sulfídrico, amônia e novas células bacterianas (CHERNICHARO, 2016). A Figura 2 apresenta o princípio de funcionamento de um reator UASB.

Figura 2 - Funcionamento de um reator UASB



Fonte: Von Sperling (2014)

Segundo Chernicharo (2016), a fase inicial da degradação anaeróbia envolve a hidrólise de materiais particulados complexos, como polímeros, convertendo-os em compostos dissolvidos mais simples, que podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas. Esse processo ocorre lentamente e é influenciado por diversos fatores, como temperatura operacional, tempo de residência do substrato, composição e tamanho das

partículas, pH do meio, bem como as concentrações de $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ e dos produtos da hidrólise (LETTINGA et al., 1996).

As bactérias acetogênicas sintóticas desempenham um papel crucial na digestão anaeróbia ao oxidar compostos orgânicos intermediários, como propionato e butirato, convertendo-os em substratos adequados para os microrganismos metanogênicos. Essas bactérias são chamadas de sintóticas devido à dependência da atividade de microrganismos consumidores de hidrogênio. A conversão desses compostos em acetato resulta na liberação significativa de H_2 , promovendo a redução do pH no meio aquoso (CHERNICHARO, 2016). A importância dos organismos acetogênicos decorre do fato de que aproximadamente 60 a 70% dos elétrons do substrato original são direcionados para a formação de acetato (MCCARTY, 1971).

A etapa final da digestão anaeróbia ocorre com a ação dos microrganismos metanogênicos, pertencentes ao domínio Archaea. Esses organismos são estritamente anaeróbios e predominam em ambientes onde aceptores de elétrons como O_2 , NO_3^- , Fe^{3+} e SO_4^{2-} estão ausentes ou em baixas concentrações (CHERNICHARO, 2016). Dessa forma, a metanogênese pode ser classificada como uma forma de respiração anaeróbia, onde dióxido de carbono, compostos metilados e acetato atuam como aceptores de elétrons.

As arqueas metanogênicas são divididas em dois principais grupos:

- Metanogênicas acetoclásticas: utilizam acetato como fonte de carbono e energia, produzindo gás carbônico (CO_2) e metano (CH_4).
- Metanogênicas hydrogenotróficas: utilizam gás carbônico como fonte de carbono e hidrogênio como fonte de energia, com o CO_2 atuando como acceptor final de elétrons.

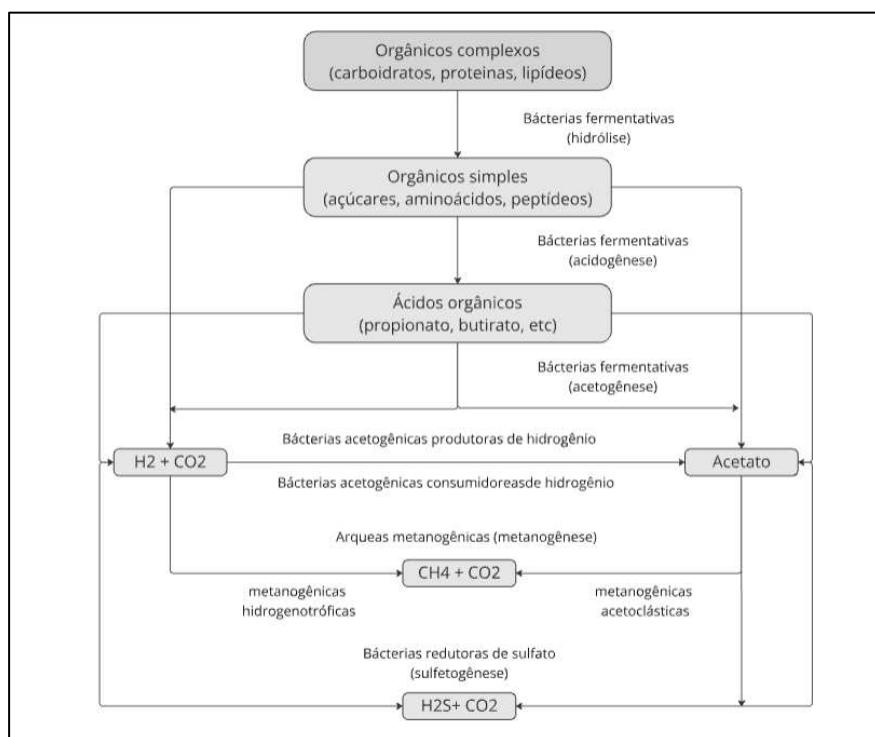
Nos reatores UASB, a concentração de biomassa é elevada, formando a chamada manta de lodo, que permite um tempo de retenção de sólidos superior ao tempo de retenção hidráulica. Isso possibilita uma degradação mais eficiente da matéria orgânica em um volume reduzido, tornando os UASB altamente atrativos para o tratamento de efluentes devido à menor necessidade de área para sua instalação.

A produção de sulfetos nos reatores ocorre quando compostos contendo enxofre, como sulfato e sulfito, atuam como aceptores de elétrons na oxidação de compostos orgânicos. Nesse processo, tais compostos são reduzidos a sulfeto por bactérias anaeróbias, que podem ser classificadas em dois grandes grupos metabólicos:

- Bactérias que realizam a oxidação incompleta dos substratos até o acetato.
- Bactérias que oxidam completamente seus substratos orgânicos, incluindo o acetato, até dióxido de carbono (CHERNICHARO, 2016).

De acordo com Chernicharo (2016), a sulfatogênese caracteriza-se pelo uso de acetato e hidrogênio pelas bactérias redutoras de sulfato (BRS), tornando-as concorrentes diretas das metanogênicas por substratos comuns. A predominância da sulfatogênese ou da metanogênese depende da concentração de sulfato no meio, podendo afetar a eficiência do processo anaeróbio e influenciar a produção final de metano. A Figura 3 apresenta o fluxograma das rotas metabólicas e dos grupos microbianos que participam do processo de digestão anaeróbia.

Figura 3 -Rotas Metabólicas



Fonte: Adaptado de Lettinga et al. (1996), Chernicharo (2016).

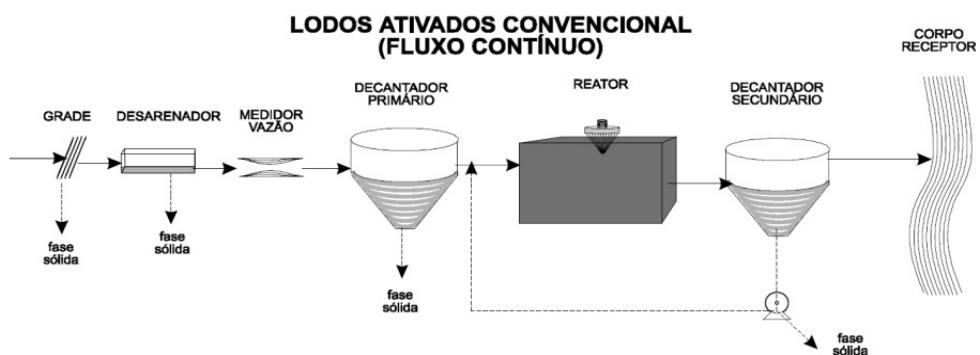
3.8.3. Lodos ativados convencional

O sistema convencional de tratamento por Lodos Ativados aeróbios apresenta uma maior eficiência na remoção de matéria orgânica em comparação com os tratamentos anaeróbios, como o reator de fluxo ascendente (RAFA ou UASB). É um método amplamente utilizado em todo o mundo e demonstra excelente eficácia na remoção de matéria orgânica biodegradável, medida em termos de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), quando operado corretamente.

Segundo Von Sperling (2005), o sistema de lodos ativados convencional apresenta uma remoção de matéria orgânica carbonácea, medida em termos de DBO e Demanda Química de Oxigênio (DQO), de 85 a 93% e 80 a 90%, respectivamente (VON SPERLING, 2014).

O sistema de lodos ativados convencional é constituído por um tanque de aeração, tanque de decantação (decantador secundário) e o sistema de recirculação de lodo como apresentado na Figura 4.

Figura 4 -Fluxograma Típico do Sistema de Lodos Ativados



Fonte: Von Sperling (2014)

O reator responsável pelas reações bioquímicas de estabilização da matéria orgânica sob condições de alta taxa de aeração é chamado de tanque de aeração. A aeração pode ser controlada por sistemas mecânicos ou por injeção de ar por difusores (METCALF; EDDY, 2016). A biomassa formada é separada da fase líquida no decantador secundário, e a fase líquida segue para a próxima etapa de tratamento ou é lançada no corpo receptor. A fase sólida contendo microrganismos ainda ativos é recirculada para o tanque de aeração (CAVALCANTI 2012; VON SPERLING, 2014).

Através desse sistema, é possível garantir um baixo tempo de detenção da fase líquida e um alto tempo de detenção dos ativos sólidos, o que resulta em uma eficiência elevada na remoção de matéria orgânica. A idade do

lodo, é o tempo de permanência dos sólidos no sistema, deve ser controlada diariamente para evitar o excesso de lodo (JORDÃO; PESSÔA, 2017). Para controlar a idade do lodo, é necessário descartar o lodo excedente, que deve ser tratado até a disposição final correta (VON SPERLING, 2014).

As variantes do processo de lodo dependem das características do efluente e da qualidade final desejada. Esse tipo de sistema requer um decantador primário para retirar a matéria orgânica em suspensão sedimentável antes do tanque de aeração, gerando economia de energia (VON SPERLING, 2014). O tempo de detenção hidráulica é baixo, da ordem de 6 a 8 horas, e a idade do lodo em torno de 4 a 10 dias. O lodo retirado ainda jovem possui uma grande quantidade de matéria orgânica em suas células, tornando necessária a estabilização do lodo (NUNES, 2012).

3.9. Tratamento Físico-químico

O tratamento físico-químico consiste na união de operações físicas unitárias (mistura, floculação, sedimentação, flotação e filtração) com as operações químicas unitárias (precipitação, adsorção e desinfecção), que podem atuar simultaneamente na remoção de poluentes.

3.9.1. Coagulação

A coagulação e a floculação são etapas fundamentais nos processos de tratamento de água e efluentes, sendo amplamente utilizadas para a remoção de sólidos suspensos, matéria orgânica, metais pesados e microrganismos patogênicos. Esses processos atuam na desestabilização e aglomeração de partículas finas em suspensão, promovendo sua posterior sedimentação e remoção (JORDÃO & PESSOA, 2017).

A coagulação é um processo muito utilizado por promover a clarificação de efluentes contendo partículas coloidais e sólidos em suspensão. Este processo consiste na adição de agentes químicos para neutralizar as cargas elétricas das partículas, ocorrendo ligações químicas e absorção das cargas superficiais presentes (ECKENFELDER, 1989).

Durante o processo de coagulação/floculação, ocorre uma redução dos materiais suspensos e coloidais, que são responsáveis pela turbidez e podem contribuir para as concentrações de DBO e DQO. Esse processo também pode reduzir a quantidade de matéria orgânica presente no efluente.

O termo “coagulação” é originário do latim *coagulare*, que significa “manter-se junto”. Esse processo descreve o efeito produzido pela adição de um produto químico sobre uma dispersão coloidal, resultando na desestabilização das partículas através da redução das forças que tendem a manter as mesmas afastadas (BAUMANN, 1971).

Segundo Di Bernardo e Sabogal Paz (2009), o processo de coagulação consiste na adição de um coagulante ao efluente, provocando hidrolização, polimerização e a reação com a alcalinidade, formando hidróxidos denominados gel, produzindo, na solução íons positivos. Estes íons desestabilizarão as cargas negativas dos coloides e sólidos em suspensão, reduzindo o potencial zeta a ponto próximo de zero, denominado ponto isoelétrico, permitindo a aglomeração das partículas e, consequentemente, a formação de flocos. O objetivo da coagulação é possibilitar a colisão entre as partículas e promover a flocação, provocada na formação de flocos maiores que podem ser removidos com mais eficiência em processos como filtração, sedimentação ou flotação. Isso é alcançado pela coagulação, que ajuda a unir as partículas em suspensão e formar flocos maiores, facilitando sua remoção posterior.

3.9.1.1. Coagulantes

Segundo PAVANELLI (2001), a coagulação consiste na desestabilização da dispersão coloidal, alcançada através de forças de atração entre partículas por meio da adição de produtos coagulantes apropriados, seguidos por agitação para homogeneização da mistura (PAVANELLI, 2001). Coagulante é uma substância, seja ela natural ou química, utilizada para espessar líquidos e, em alguns casos, separar a fase sólida. Essencialmente, um coagulante é qualquer substância que induz a coagulação em outra, produzindo um aumento da densidade dos flocos em relação ao meio aquoso.

3.9.1.1.1. Sulfato de Alumínio

O sulfato de alumínio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, é o produto da reação do Ácido Sulfúrico H_2SO_4 e o Hidróxido de Alumínio $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou entre o mesmo ácido e o alumínio metálico. Um dos coagulantes mais utilizados é o sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) que remove partículas e substâncias dissolvidas, por meio do arraste e precipita o que está em suspensão, com 24 eficiência na etapa de

coagulação, contudo seu uso está sendo repensada, pois contamina com os íons sulfato o solo e água (CORAL et al., 2009).

O sulfato de alumínio é um coagulante usado no tratamento de água e efluentes industriais, além do esgoto doméstico. O mesmo pode ser encontrado em duas formas, em pó e na forma líquida independente da forma ele cumpre a mesma função de coagulante (POOLPSCINA, 2016). O sulfato de alumínio é amplamente empregado devido à sua alta eficiência na remoção de turbidez e matéria orgânica, sendo utilizado principalmente no tratamento de água potável e efluentes industriais de baixa carga orgânica (SANTOS et al., 2020).

Trata-se de um coagulante que já tem algum tempo no mercado, e continua sendo bastante utilizado, em razões do seu alto grau de eficiência, quando lançado no meio ambiente causa grande danos ambientais, desde mortalidade de peixes, alteração de pH e formação de sais (FISPQ, 2007).

O sulfato de alumínio é o agente coagulante mais utilizado pelas indústrias que utilizam processos que envolvem o mecanismo de coagulação/floculação, devido a sua boa eficiência alinhado com seu acessível preço de mercado. Por outro lado, deve-se atentar a quantidade de alumínio na água, pois quando em excesso afeta bruscamente a turbidez da água (MENEZES, 2019).

3.9.1.1.2. Cloreto Férrico

Os sais de ferro são, também, muito utilizados como agentes coagulantes, pois produzem bons flocos. Esses sais reagem de forma a neutralizar as cargas negativas dos coloides e proporcionam a formação de hidróxidos insolúveis de ferro. Devido à baixa solubilidade dos hidróxidos férricos formados, eles podem agir sobre ampla faixa de pH (PAVANELLI, 2001). De acordo com Richter (2009) esta faixa vai de 4 a 11.

O Cloreto Férrico apresenta alta eficiência na remoção de metais pesados e compostos orgânicos dissolvidos, sendo utilizados frequentemente no tratamento de efluentes industriais com alta carga orgânica (SANTOS et al., 2020).

No estudo de Resende e Carvalho (2002) no tratamento de esgoto, utilizando como coagulante o cloreto férrico e um polímero aniónico como

auxiliar, apresentou para DBO remoção de 82% e para sólidos suspensos totais de 69%.

3.9.1.1.3. Policloreto de Alumínio

O Policloreto de Alumínio (PAC) é um agente coagulante, inorgânico e polimerizado, que se apresenta como um líquido marrom viscoso. É amplamente utilizado no tratamento e clarificação de águas para consumo e tratamento de efluentes industriais. O PAC é produzido comercialmente por meio da reação controlada de sais de alumínio com uma base. (PERNITSKY; EDZWALD, 2003; 2006; WEI et al., 2015; ZHANG et al.,2017).

O policloreto de alumínio apresenta vantagens em relação ao sulfato de alumínio, como maior eficiência na remoção de matéria orgânica e menor produção de lodo. Além disso, sua aplicação permite trabalhar em uma faixa de pH mais ampla, reduzindo a necessidade de ajustes químicos adicionais (JORDÃO & PESSOA, 2017).

Os coagulantes são caracterizados pelo seu grau de neutralização ® ou basicidade. Sua basicidade, varia entre 15 e 85%, sendo acima de 60% considerada alta, afeta o consumo de alcalinidade do coagulante e a formação de espécies poliméricas ou monoméricas. A termodinâmica da formação de espécies dissolvidas de alumínio e do precipitado amorfo de Al(OH)₃ são altamente dependentes do pH do meio (PERNITSKY; EDZWALD, 2003; 2006; WEI et al., 2015; ZHANG et al.,2017).

3.9.2. Floculação

Após a etapa de coagulação, segue-se o processo de floculação, que é a etapa física em que os coloides descarregados se aglomeram para formar flocos que sedimentam a uma velocidade adequada. Esse processo ocorre sob condições de inspiração lenta, limitando os gradientes que geraram tensão cisalhante nos flocos existentes, a fim de que não ultrapassem a capacidade de resistência ao cisalhamento dessas partículas (JOSE ALVES NUNES, 2012).

Na floculação, ocorre a aglutinação dos coloides por meio da adição de agentes floculantes, que promovem a união das partículas em agregados maiores. Esses agregados maiores, chamados de flocos, são mais densos do que a solução líquida e sedimentam mais rapidamente, permitindo uma

separação mais eficiente do líquido e dos sólidos (JOSE ALVES NUNES, 2012).

Em efluentes industriais, tem-se verificado que os flocos formados necessitam de maior densidade para poderem sedimentar em decantadores. Recorre-se, então, aos auxiliares de coagulação, que são os polieletrolitos que aumentam a velocidade de sedimentação dos flocos e a resistência às forças de cisalhamento (JOSE ALVES NUNES, 2012).

3.9.2.1. Polímeros Utilizados como Floculantes

Os polímeros, ou polieletrolitos, são formados a partir de monômeros simples que sofrem polimerização, surgiram em substâncias de alto peso molecular com pesos moleculares que variam de 104 a 106, como indicado por METCALF e EDDY em 1995. Os polímeros podem apresentar variações no peso molecular, estrutura, intensidade e tipo de carga, bem como em sua composição. A intensidade da carga é influenciada pelo grau de ionização dos grupos funcionais, pelo grau de copolimerização e/ou pela quantidade de grupos substituídos na estrutura do polímero, de acordo com (WAKEMAN e TARLETON, 1999).

Existem três tipos de polímeros comumente utilizados: catiônicos, aniônicos e não iônicos. Os polímeros catiônicos, quando dissolvidos em água, se ionizam e adquirem carga positiva, agindo como cátions. Os aniônicos, por sua vez, adquirem carga negativa e operam como ânions. Os polímeros não iônicos, por sua vez, não se ionizam em água, mas são considerados polieletrolitos devido às suas aplicações semelhantes.

Em polímeros catiônicos, a carga positiva está conectada à cadeia do polímero, enquanto nos aniônicos a carga negativa está conectada à cadeia (SANTOS FILHO, 1973).

Polímeros de alto peso molecular possuem cadeias longas e são capazes de estabelecer ligações entre partículas dispersas na água, aglutinando-as e comunicando-as em partículas maiores. Para que a aglutinação seja ocasionada, é necessário que a molécula do polímero seja adsorvida nas superfícies de duas ou mais partícula. A carga, o peso molecular e o grupo funcional do polímero são fundamentais para esse processo. A carga do polímero serve para neutralizar as cargas das partículas em suspensão na

água, e quanto mais ativo para o grupo funcional, maior será a facilidade de adsorção das partículas ao polímero (SANTOS FILHO, 1973).

Ao adicionar um excesso de polímero catiônico a uma água a ser clarificada, as partículas suspensas adquirem cargas positivas e permanecem dispersas na água. Isso é chamado de “reversão de carga”. Em seguida, o excesso de cargas positivas é cuidadosamente neutralizado com um polímero aniónico, o que leva à aglutinação das partículas e consequente clarificação da água. Sendo o peso molecular e o grupo funcional do polímero fundamentais para esse processo (DI BERNARDO, 1993).

3.10. Gerenciamento de Lodo

3.10.1. Leitos de Secagem

Os leitos de secagem são unidades utilizadas para a desidratação de lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto e efluentes industriais. O processo ocorre por meio da drenagem da água livre e da evaporação, resultando na redução do volume e do teor de umidade do lodo (VON SPERLING, 2014). Essas unidades são compostas por camadas de material filtrante, como areia e cascalho, que facilitam a drenagem do líquido.

Os leitos de secagem podem ser classificados em dois tipos principais:

- Leitos de secagem não cobertos: Dependem da ação da radiação solar e do vento para promover a evaporação da água residual.
- Leitos de secagem cobertos: Contam com proteção contra intempéries, permitindo maior controle do processo e redução de odores indesejáveis (CAMPOS, 2010).

A eficiência da secagem depende de fatores como a espessura da camada de lodo, a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar e o tempo de residência. O lodo seco pode ser destinado à disposição final em aterros, incineração ou reaproveitamento agrícola, desde que atenda aos padrões ambientais estabelecidos (JORDÃO & PESSOA, 2017).

3.10.2. Centrifugas de Lodo

As centrífugas de lodo são equipamentos utilizados para a desidratação de lodo em estações de tratamento de efluentes. O princípio de

funcionamento baseia-se na separação da fase sólida e líquida por meio da força centrífuga, promovendo uma rápida remoção da água residual do lodo (VON SPERLING, 2014).

Os principais tipos de centrífugas utilizadas são:

- Centrífugas decantadoras: Utilizadas para lodos com alta concentração de sólidos, garantindo uma separação eficiente por meio da sedimentação acelerada (CAMPOS, 2010).
- Centrífugas de disco: Mais indicadas para lodos com menor concentração de sólidos e aplicações que exigem alta eficiência na remoção de umidade (JORDÃO & PESSOA, 2017).

As vantagens do uso de centrífugas incluem:

- Redução significativa do volume de lodo.
- Maior rapidez no processo de desidratação em comparação com métodos tradicionais, como leitos de secagem.
- Menor necessidade de espaço físico para instalação.

No entanto, essas unidades possuem alto consumo energético e necessitam de manutenção frequente para garantir seu funcionamento eficiente (SANTOS et al., 2020).

3.10.3. Filtro Prensa

Os Filtros Prensa são equipamentos amplamente utilizados no tratamento de águas e efluentes, pois são uma opção vantajosa para quem quer baixo custo de manutenção, menor consumo de energia, possibilidade de reaproveitamento do material retido e concentra elevada área de filtragem em pequeno espaço físico de instalação (LEGNER, 2017).

São utilizados tanto pelas indústrias como no tratamento de esgotos de grandes metrópoles. Esses filtros se aplicam para projetos que buscam um maior teor de sólidos secos com um baixo consumo de energia elétrica, evitando o transporte e descarte de água. Um exemplo de utilização é em Estações de Tratamento, para desidratação do efluente, reduzindo o volume de lodo gerado, e assim diminuindo os custos de destinação do lodo (LEGNER, 2017).

O Filtro Prensa, como mostrado na figura (x), é uma máquina mecânica acoplada a uma bomba que através da succão do líquido a ser filtrado recalca o mesmo no elemento filtrante que está colocado entre uma série de placas com recesso alinhado em sequência. O material do elemento filtrante depende da necessidade de cada processo e objetivo industrial, podendo, por exemplo, ser de tecido fabricado com fios de polipropileno, poliéster, etc (LEGNER, 2017). A figura 5, apresenta um modelo de filtro prensa industrial.

Figura 5 - Filtro prensa industrial



Fonte: industrial 4.0

3.11. Tratamento Terciário

3.11.1. Filtração

A filtração é um processo físico empregado no tratamento de efluentes com o objetivo de remover partículas suspensas, sólidos finos, microrganismos e algumas substâncias dissolvidas, melhorando a qualidade final da água tratada. Esse processo pode ocorrer por meio de barreiras físicas porosas que retêm as impurezas, permitindo a passagem da água clarificada (VON SPERLING, 2014).

Os principais tipos de filtração incluem:

- Filtração em areia: Utilizada amplamente no polimento de efluentes, removendo partículas finas e reduzindo a turbidez.

- Filtração em carvão ativado: Empregada para a remoção de compostos orgânicos dissolvidos, cor, odores e alguns contaminantes químicos (JORDÃO & PESSOA, 2017).
- Membranas filtrantes: Tecnologias como ultrafiltração e osmose reversa são utilizadas para a remoção de contaminantes em nível molecular, garantindo alta eficiência no tratamento de efluentes industriais e sanitários (CAMPOS, 2010).

A escolha do tipo de filtração depende das características do efluente e dos padrões de qualidade exigidos para o descarte ou reuso da água tratada. A filtração pode ser empregada como uma etapa final no tratamento de efluentes, garantindo uma qualidade superior do efluente final antes de sua disposição no meio ambiente (SANTOS et al., 2020).

A separação por filtração se realiza pela passagem forçada de um determinado fluido através de uma membrana porosa, onde as partículas sólidas ficam retidas nos poros da membrana e acumulam-se, formando uma camada sobre esta membrana. O fluido, que pode ser um gás ou líquido, por sua vez, passa pelo leito de sólidos e através da membrana retentora e é denominado “filtrado”. Já o produto desejado pode ser tanto o fluido clarificado quanto a torta de partículas sólidas (SVAROVSKY, 2000).

Existem dois tipos de filtros: os de profundidade e os de superfície. Os filtros de profundidade retêm sólidos em toda a camada filtrante, enquanto os filtros de superfície apresentam uma camada filtrante uniforme, rígida e delgada, funcionando como uma peneira. Atualmente, o processo de filtração em membranas é o mais desenvolvido para aplicação em efluentes industriais, podendo ser utilizado em reatores de lodos ativados para concentração de flocos biológicos, bem como em processos de polimento para retenção de microrganismos ou transmissores orgânicos responsáveis por cor ou toxicidade.

3.11.2. Desinfecção.

Os processos de desinfecção visam destruir ou inativar organismos patogênicos ou outros organismos suscetíveis de causar doenças. Esses organismos podem sobreviver na água por várias semanas a temperaturas próximas a 21°C e, em alguns casos, por vários meses a temperaturas baixas. A sobrevivência desses organismos na água depende de vários fatores, como temperatura, pH, turbidez, oxigênio, nutrientes, competição com outros

organismos e resistência a substâncias tóxicas. O objetivo do processo não é necessariamente esterilizar completamente todas as formas de vida, embora em muitos casos o processo de desinfecção seja levado até o ponto de esterilização (Meyer, 1994).

3.11.2.1. Cloro

De acordo com Santos et al. (2013), o cloro é o agente químico mais utilizado para desinfetar águas de abastecimento e resíduos. Inicialmente, o hipoclorito de sódio era obtido por aplicação eletrolítica do cloreto de sódio. O cloro e seus componentes são considerados fortes agentes oxidantes. Em geral, sua reatividade diminui com o aumento do pH e sua velocidade de reação aumenta com o aumento da temperatura. A reação do cloro com compostos inorgânicos redutores, como sulfetos, sulfitos, íon ferroso e nitrito, é geralmente muito rápida. Alguns compostos orgânicos também reagem com o cloro, mas em geral, são necessárias algumas horas para que a maioria das reações do cloro com compostos orgânicos se completem (Meyer, 1994).

3.11.2.2. Ozônio

O ozônio apresenta alto poder oxidante, tornando-se atrativo para a desinfecção de esgotos domésticos. O alto poder oxidante é desejável porque diminui muito as concentrações e o tempo necessário para a desinfecção e, desse modo, haverá economia na construção e operação das instalações. Outro benefício a considerar é que os subprodutos orgânicos da ozonização de efluentes domésticos tratados a nível secundário geralmente apresentam pouca ou nenhuma toxicidade a nível agudo. Existe ainda a vantagem da redução de cor, que, mesmo nas dosagens relativamente baixas, tem se mostrado efetiva. O poder desinfetante do ozônio é cerca de dez vezes superior ao do cloro, e isto para todos os tipos de microrganismos (DI BERNARDO, 1993).

O ozônio é um oxidante extremamente forte, e por esta característica tem sido usado na desinfecção de água de abastecimento público e esgotos tratados. Por causa de sua instabilidade química se decompõe em oxigênio muito rapidamente após sua geração e, portanto, deve ser gerado próximo do ponto de uso (CRITES et al, 1998).

Embora o ozônio seja um desinfetante bastante utilizado para águas de abastecimento, ele não é muito aplicado para desinfecção de águas residuárias em função da alta exigência, em quantidade de ozônio (ROBSON & RICE, 1991; XU et al., 2002; GEHR et al., 2003).

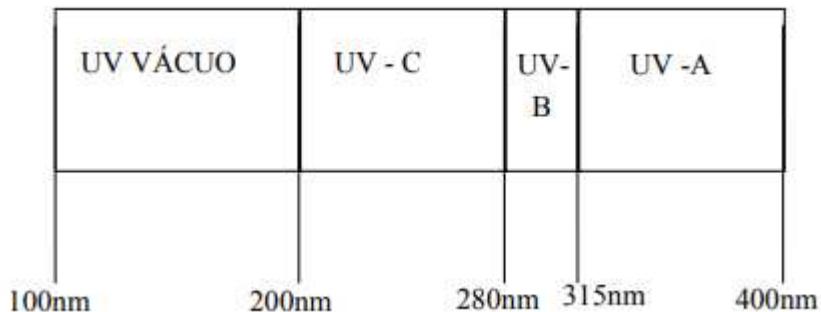
A matéria orgânica é rapidamente oxidada pelo ozônio e pode ser realizada antes (pré-ozonização) ou após o tratamento biológico, porém a aplicação após o tratamento biológico é mais comumente realizada como etapa de polimento a fim de atender aos padrões químicos e microbiológicos para lançamento nos corpos receptores ou naqueles casos em que se deseja reusar o efluente (RICE et al., 1981; PARASKEVA & GRAHAM, 2002; METCALF & EDDY, 2002).

3.11.2.3. Radiação Ultravioleta

A fonte primária de radiação ultravioleta é o sol, mas também pode ser emitida por lâmpadas incandescentes e fluorescentes, solda elétrica, maçarico de plasma e equipamentos a laser. A absorção da radiação de comprimento de onda UV menores pelo ozônio da atmosfera protege a vida na terra. Mesmo assim os raios ultravioletas que atingem a superfície da terra têm energia suficiente para inativar os microrganismos menos resistentes (DANIEL, 1993).

O espectro ultravioleta pode ser dividido em 4 partes. (KÖNIG, 2001) (Figura 6).

Figura 6 - Espectro ultravioleta



Fonte: Konig,2001

As ondas com frequências menores que 250nm causam a dissociação do oxigênio molecular do ozônio O₃; ondas menores que 160 nm podem causar a dissociação do nitrogênio molecular o qual reage formando óxido de

nitrogênio; comprimentos de ondas menores que 290nm causam a decomposição de hidrocarbonos clorados. (INDUSTRIAL HYGIENE INGENEERING, 1988).

4. METODOLOGIA

4.1. Classificação da Metodologia

A pesquisa utilizou uma abordagem de estudo de caso para investigar e analisar o manejo de efluentes avícolas provenientes da lavagem de animais e veículos de transporte em uma instalação avícola. A coleta de dados foi realizada por meio de amostragem sistemática dos efluentes ao longo do processo de produção, seguida de análises laboratoriais para determinar a composição química, microbiológica e físico-química deles. Posteriormente, foram realizados experimentos para avaliar a eficácia de diferentes tecnologias de tratamento de efluentes, como processos de coagulação-flocação, filtração, entre outros.

4.2. Caracterização do local de estudo

A empresa de alimentos fundada em 1966, está localizada no distrito industrial na cidade de Maracanaú-CE, atuando no ramo de avicultura gerando aproximadamente 1.146 empregos diretos. Possui diversas unidades espalhadas pelo estado do Ceará. Dentre essas unidades, encontra-se a Unidade I da empresa, onde encontra-se a sede administrativa. Além da sede administrativa, ocorrem outras operações como o centro de manutenção dos veículos e a lavagem dos veículos da frota de caminhões. Nessa operação de lavagem de veículos são geradas águas residuárias que precisam ser submetidas a tratamento para a correta destinação ao meio ambiente. O efluente tratado deverá possuir padrão de qualidade para fins de reuso interno paisagístico, especialmente para fins de irrigação.

4.3. Caracterização do efluente

O efluente é gerado a partir de um local de transporte e lavagem de frangos, apresenta características específicas, sendo resultante de atividades de limpeza de veículos, equipamentos e das aves. Esse efluente contém uma mistura de substâncias orgânicas, inorgânicas e microbianas que devem ser

tratadas adequadamente para minimizar impactos ambientais. As principais características desse tipo de efluente incluem:

4.3.1. Alta carga orgânica

- Sólidos suspensos: Fragmentos de penas, fezes, restos de alimentos, sujeira, gordura e outros materiais orgânicos.
- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO): Indicador da quantidade de matéria orgânica biodegradável. Esse efluente possui altos níveis de DBO, uma vez que contém sangue, gordura e matéria fecal.
- Demanda Química de Oxigênio (DQO): Quantidade de oxigênio necessária para oxidar quimicamente a matéria orgânica e inorgânica. Normalmente, a DQO também é alta devido à presença de substâncias orgânicas mais complexas e gorduras.

4.3.2. Nutrientes

- Nitrogênio e Fósforo: Subprodutos de excreções e restos orgânicos. Esses nutrientes em excesso podem causar eutrofização em corpos d'água.

4.3.3. Presença de microrganismos patogênicos

- O efluente contém bactérias, vírus e parasitas que podem ser transmitidos pelas fezes dos frangos e pelo contato com a água de lavagem, representando risco à saúde pública se não tratado adequadamente.

4.3.4. Óleos e graxas

- Derivados da limpeza de superfícies e resíduos presentes nas aves. Esses compostos devem ser removidos antes do descarte.

4.3.5. pH variável

- Dependendo dos produtos químicos utilizados no processo de lavagem (detergentes, desinfetantes), o pH pode variar de ácido a alcalino, impactando os processos de tratamento.

4.3.6. Outros contaminantes

- Produtos químicos: Substâncias como desinfetantes e detergentes utilizados na limpeza podem estar presentes.
- Sólidos inorgânicos: Resíduos como terra e poeira podem ser carreados com o efluente.

Esses efluentes necessitam de um tratamento robusto que inclua remoção de sólidos, tratamento biológico para redução de DBO/DQO e a desinfecção final, para garantir que o descarte esteja dentro dos padrões ambientais.

A determinação da vazão da Estação de Tratamento de Efluentes Industriais – ETEI, foi obtida a partir de um medidor de vazão ultrassônico. As atividades no empreendimento funcionam durante 18 horas. A vazão das águas residuárias foi determinada observando os dois principais processos:

1. Lavagem dos veículos de transporte de aves
2. Lavagem das grades de transporte de aves.

A lavagem dos veículos é feita por meio de hidrojateamento, processo mais comum, mas que também resulta no consumo de grandes quantidades de água. A lavagem das grades de transporte de aves é feita em equipamento específico, sendo também gastos elevado volume de água para o processo.

Foi feita a amostragem composta durante 6h (das 9h às 15h) no dia 03 de fevereiro de 2023. O procedimento de coleta foi simples, sendo feitas coletas de 3 litros de amostra de efluente a cada hora, totalizando aproximadamente 18 L de efluente. O ponto de amostragem foi o canal onde todas as contribuições de origem industrial se concentravam. Dessa coleta composta, foi enviada uma alíquota para análise laboratorial (amostra de efluente bruto) e o restante enviado para estudo de tratabilidade por meio de ensaios de teste de jarro (jar test).

A amostra destinada para ensaio de tratabilidade foi armazenada a baixas temperaturas (< 4°C) para que o ensaio fosse procedido no dia seguinte (04 de fevereiro). Após os ensaios a alíquota do efluente que obteve melhor resultado de clarificação foi enviado ao laboratório para uma outra análise físico-química, visando avaliar o comportamento do efluente submetido ao processo de tratamento em escala laboratorial.

Inicialmente o efluente bruto deverá ser desviado do atual canal de escoamento de efluente para o pré-tratamento no canal de gradeamento fino, que visa a remoção de sólidos grosseiros. Em seguida, a caixa de areia realiza a desarenação. Após os canais de desarenação, o efluente será encaminhado a uma calha do tipo Parshall para medição de vazão.

Como o efluente apresenta uma significativa concentração de óleos e graxas, uma caixa de remoção de gordura foi adicionada ao sistema, visando a remoção de óleos e graxas flutuantes, as substâncias mais densas flutuam e são retiradas da superfície. Essa remoção ocorre de maneira periódica. Logo depois, o efluente irá ser direcionado para um tanque de equalização, onde ocorrerá a uniformização e regularização hidráulica da operação das unidades de tratamento a jusante. Quando requerido, pode ocorrer a dosagem de corretores de pH como agentes acidulantes ou alcalinizantes. A agitação deverá ser fornecida pela adoção de um aerador superficial.

O efluente primário será encaminhado para o decantador primário onde espera-se uma sedimentação de 70% dos sólidos sedimentáveis e uma redução de 30% de matéria orgânica. Neste processo o efluente fica em repouso dentro do tanque por um tempo para que os sólidos sedimentem formando a fase lodo e a fase clarificado.

Após o processo de decantação primária, a matéria orgânica biodegradável que ainda esteja presente no efluente do processo físico será consumida por meio de processo de degradação biológica de aeração/decantação característico do sistema de lodos ativados.

O efluente é direcionado a um reator aeróbio, que opera sob condições de aeração contínua para promover o crescimento de microrganismos aeróbicos que degradam a matéria orgânica. O oxigênio é injetado no reator por meio de difusores, garantindo que o meio seja rico em oxigênio dissolvido. Os microrganismos aeróbios (bactérias, protozoários e fungos) presentes no sistema irão realizar a degradação da matéria orgânica, transformando-a em biomassa (lodo biológico), H₂O e CO₂.

Após a aeração, o efluente é direcionado a um decantador secundário, onde irá ocorrer a sedimentação do lodo biológico, uma parte desse lodo é recirculado para o reator aeróbio, a fim de manter a biomassa ativa no sistema. Já o excedente é enviado para os leitos de secagem.

Posteriormente ocorrerá a dosagem de agente coagulante PAC em linha e em seguida a adição de um floculante (Polímero aniónico) dentro do tanque de flocação. O agente coagulante irá aglomerar as partículas finas e coloidais que não foram removidas nas etapas anteriores, através da neutralização das partículas, possibilitando que ocorra a aglomeração em flocos maiores. O efluente é submetido a uma agitação lenta, permitindo que se aglomerem em flocos maiores. A parte sólida é removida e encaminhada para um poço de lodo, o efluente segue para as demais etapas.

Após o processo de coagulação/flocação o efluente será então submetido a processo de dupla filtração em leito de areia e antracito e em leito de carvão ativado. A filtração em leito de areia e antracito irá remover sólidos suspensos e partículas finas remanescentes no sistema. Já a filtração em leito de carvão ativado, irá remover compostos orgânicos dissolvidos, incluindo odor, sabor, cor e compostos tóxicos. O carvão ativado possui uma alta capacidade de adsorção de substâncias orgânicas e compostos químicos remanescentes.

Por fim, o efluente será submetido ao processo de desinfecção por meio de cloração. A adição de cloro promove a eliminação de até 99% dos microrganismos patogênicos, garantindo que após todos esses processos o efluente final estará apto para reúso. O lodo descartado do processo será encaminhado para os leitos de secagem. Após o desaguamento, a parte sólida deverá ser encaminhada para o aterro sanitário.

5. RESULTADOS

Os resultados obtidos através das análises serão apresentados a seguir, iniciando pela caracterização do efluente.

5.1. Caracterização do Efluente

O efluente é composto por duas fontes diferentes, uma é a lavagem dos caminhões que gera 40 m³/d e a outra é a lavagem das aves, que gera 60 m³/d. Totalizando a vazão de entrada no sistema de tratamento de 100 m³/d. A Tabela 4, apresenta a caracterização do afluente ao sistema de tratamento.

Tabela 4 - Dados do Efluente Bruto.

AFLUENTE DE ENTRADA		
Parâmetros	Resultado	Padrão – COEMA 02/2017
Cor aparente	Ausente	Ausente
pH (-)	7,08	5,0 – 9,0
Temperatura (°C)	29,0	<4 0,0
Alcalinidade Total (mg/L)	246,0	-
SSH – Óleos Minerais (mg/L)	454,0	< 20,0
SSH – Óleos Vegetais e Animais (mg/L)	681,0	< 50,0
Cianeto Livre (mg/L)	< 0,01	< 0,2
Cianeto Total (mg/L)	< 0,01	< 0,2
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	15,40	Até 20,0, se pH <= 8,0 Até 5,0, se pH > 8
Sulfato (mg/L)	0,90	< 500,0
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	520	-
Sulfeto	1,10	< 1,0
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	226,0	< 100,0
DBO (mg/L)	430,0	-
Materiais Flutuantes (mg/L)	Presente	Ausência
Coliformes Termotolerantes (NPM/100 ml)	8.000	< 5.000

Sólidos Sedimentáveis (mg/L)	5,0	<1,0
DQO (mg/L)	1.307,70	< 200

Fonte: autor (2025)

A DBO apresenta valores típicos de efluente sanitário. Já a DQO apresenta valores mais elevados que os sanitários. Caracterizando dessa forma, o efluente com elevada carga orgânica. Além disso, possui elevadas concentrações de óleos e graxas. A partir da relação DBO / DQO, verifica-se que é possível realizar o tratamento biológico do efluente, porém ele de forma unitária não será suficiente para atendimento a legislação. (MedCalf & Eddy, 2014).

A partir do efluente bruto, foram realizados testes de jarro para auxiliar no dimensionamento do sistema físico-químico. A tabela 5 apresenta os resultados obtidos a partir do teste de jarro.

Tabela 5- Parâmetros de qualidade de água do efluente pós ensaio de tratabilidade em laboratório.

EFLUENTE PÓS ENSAIO DE TRATABILIDADE – JAR TEST		
Parâmetros	Resultado	Padrão – COEMA 02/2017
Cor aparente	Ausente	Ausente
pH (-)	5,58	5,0 – 9,0
Temperatura (°C)	29,0	<4 0,0
Alcalinidade Total (mg/L)	62,0	-
SSH – Óleos Minerais (mg/L)	88,0	< 20,0
SSH – Óleos Vegetais e Animais (mg/L)	106,0	< 50,0
Cianeto Livre (mg/L)	NR	< 0,2
Cianeto Total (mg/L)	NR	< 0,2
,Nitrogênio Ammoniacal (mg/L)	NR	Até 20,0, se pH <= 8,0 Até 5,0, se pH > 8
Sulfato (mg/L)	NR	< 500,0
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	NR	-
Sulfeto	0,01	< 1,0

Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	70,0	< 100,0
DBO (mg/L)	91	-
Materiais Flutuantes (mg/L)	NR	Ausência
Sólidos Sedimentáveis (mg/L)	NR	<1,0
DQO (mg/L)	275,13	< 200

- NR: Não relacionado.

Fonte: autor (2025)

A partir disso, foi possível notar que houve significativa redução nos parâmetros de DQO, DBO e óleo minerais.

5.2. Dimensionamento

Segundo Von Sperling (2014, p. 261) o tratamento preliminar visa sobretudo, a remoção de sólidos grosseiros e areia por meio de processos unitários físicos. Além de, incluir uma etapa de medição de vazão.

Para MedCalf e Eddy, o primeiro processo unitário geralmente encontrado em estações de tratamento é o gradeamento. E sua principal função é a remoção de materiais grosseiros contidos nos esgotos, que apresentam potencial de (1) danificar ou obstruir equipamentos de processos subsequentes, (2) limitar a segurança e a eficiência de todo o processo ou (3) contaminar as tubulações.

Os cálculos para o dimensionamento do tratamento preliminar serão descritos a seguir.

5.2.1. Determinação da Vazão

➤ Vazão média

$$Q_{med} = \frac{Q_p}{T_{os}} \quad (1)$$

Sendo:

Qmed: Vazão média (m^3/h);

Qp: Vazão de projeto (m^3);

Tos: Tempo de operação do sistema (h).

Substituindo na equação 1:

$$Q_{med} = \frac{100 \text{ m}^3}{18 \text{ h}}$$

$$Q_{med} = 5,55 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Transformando para l/s:

$$Q_{med} = 5,55 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{1000 \text{ l}}{3600 \text{ s}}$$

$$Q_{med} = 1,54 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

➤ Vazão máxima

$$Q_{max} = Q_{med} \times k1 \quad (2)$$

Sendo:

Q_{max} : Vazão máxima (m^3);

$K2$: 1,5 (Coeficiente da hora de maior consumo);

Substituindo na equação 2:

$$Q_{max} = 5,55 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 1,5$$

$$Q_{max} = 8,325 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Transformando para l/s:

$$Q_{max} = 8,325 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \frac{1000 \text{ l}}{3600 \text{ s}}$$

$$Q_{max} = 2,31 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

➤ Vazão mínima

$$Q_{min} = Q_{med} \times k3 \quad (3)$$

Sendo:

Qmin: Vazão mínima (m^3);

K3: 0,5 (Coeficiente da hora de menor consumo).

Substituindo na equação 3:

$$Q_{min} = 8,325 \frac{m^3}{h} \times 0,5$$

$$Q_{min} = 4,1625 \frac{m^3}{h}$$

Transformando para l/s:

$$Q_{min} = 4,1625 \frac{m^3}{h} \times \frac{1000 \text{ l}}{3600 \text{ s}}$$

$$Q_{min} = 1,15 \frac{l}{s}$$

A partir da vazão será feito o dimensionamento do sistema como detalhado na metodologia.

5.2.2. Tratamento Preliminar

5.2.2.1. Dimensionamento das Grades

As grades de barras convencionais são compostas por dispositivos responsáveis pela retenção e remoção de sólidos, conforme indicado por Jordão e Pessoa (2017). Nos últimos anos, observou-se a necessidade de remover partículas de menores dimensões ainda na etapa de tratamento preliminar. Por essa razão, foi adotado um espaçamento de 15 mm entre as barras, com uma seção de 6,4 x 38,1 mm (1/4" x 1 1/2") e uma inclinação de 60°.

Além disso, Jordão e Pessoa (2017) ressaltam que a velocidade de passagem entre as barras não deve ser excessiva, recomendando-se valores entre 0,4 e 1,2 m/s para a vazão máxima de projeto. Diante disso, optou-se por adotar uma velocidade de passagem de 0,5 m/s.

A eficiência da grade é dada pela Equação 4:

$$E = \frac{a}{a + t} \quad (4)$$

Na qual:

E = eficiência da grade;

a = espaçamento entre as barras;

t = largura das barras.

Portanto, tem-se:

$$E = \frac{15}{15 + 9,5} = 0,612$$

$$E = 61,2 \%$$

A área útil (A_u) na seção da grade, representada pela área livre entre as barras, é dada pela Equação 5:

$$A_u = \frac{Q_{máx}}{v} \quad (5)$$

Onde:

Q = Vazão de projeto;

v = velocidade de passagem = 0,4 m/s.

Assim, tem-se:

$$A_u = \frac{0,00231}{0,4}$$

$$A_u = 0,0057 \text{ m}^2$$

A seção (S) do canal junto à grade, necessária para o escoamento, é determinada pela Equação 6.

$$S = \frac{A_u}{E} = A_u \times \frac{a + t}{a} \quad (6)$$

Obtendo assim:

$$S = \frac{0,006}{0,612}$$

$$S = 0,009 \text{ m}^2$$

O comprimento do canal (B) é determinada pela Equação 7.

$$B = \frac{Q_{\max} \times t'}{S} \quad (7)$$

Onde:

$$t' = 3\text{s};$$

É recomendado a utilização da velocidade máxima para o cálculo do comprimento do canal. (Sergio Rolim, 2019).

Desse modo, tem-se que:

$$B = \frac{0,00231 \times 3}{0,009}$$

$$B = 0,77 \text{ m}$$

Assim, será adotado um comprimento de $B = 0,80 \text{ m}$.

A Largura (L) do canal é dado pela Equação 8:

$$L = \frac{S}{H_{\max}} \quad (8)$$

$$L = \frac{0,009}{0,041}$$

$$L = 0,21 \text{ m}$$

Os valores obtidos encontram-se fora do intervalo recomendado pela NBR 12209/2011, devido a vazão ser muito pequena. Mas será adotado uma largura de 0,30 metros para facilitar a operação de limpeza do canal da grade.

Para a quantidade de barras (N_b) e o espaçamento entre elas (N_e), foi adotado a equação 9:

$$N_e = N_b + 1 \quad (9)$$

$$N_e = \frac{L}{(0,001(a + t))}$$

$$N_e = \frac{0,30}{(0,001(15 + 9,5))}$$

$$N_e = 10,17$$

Assim, tem-se que o gradeamento terá 12 barras de 6, x 38,1 mm com 11 espaçamentos de 15 mm.

Desta forma, pode -se realizar a verificação das velocidades máxima, média e mínima, conforme tabela x.

Tabela 6 - Verificação das Velocidades

	Vazão (Q)	H	H - z	$A_t = B_g \cdot (H - z)$	$A_u = A_t \cdot E$	V
Qmin	0,0012 m ³ /s	0,078 m	0,021 m	0,0069 m ²	0,0042 m ²	0,27 m/s
Qmed	0,0015 m ³ /s	0,086 m	0,029 m	0,0095 m ²	0,0058 m ²	0,26 m/s
Qmax	0,0023 m ³ /s	0,098 m	0,041 m	0,0137 m ²	0,0084 m ²	0,27 m/s

Fonte: Autor (2025)

- Cálculo da perda de carga

De acordo com Jordão e Pessôa, a perda de carga em grades limpas pode ser estimada assumindo que o comportamento hidráulico é semelhante ao escoamento por um orifício. A equação simplificada utilizada para esse cálculo é apresentada a seguir.

$$H_f = 1,43 * \frac{v^2 - v'^2}{2g} \quad (10)$$

Ao qual:

h_f = perda de carga (m);

v = velocidade do fluxo entre as barras da grade (m/s);

v' = velocidade do fluxo entre as barras da grade x a eficiência do gradeamento (m/s);

g = aceleração da gravidade, igual a 9,8 (m/s²).

Assim, para perda de carga na grade limpa pelo rastelo acionado, tem-se:

- Para $Q_{máx}$:

$$H_f = 1,43 * \frac{0,4^2 - 0,24^2}{2 * 9,8}$$

$$H_f = 0,007 m$$

Assim, para perda de carga na grade considerando 50% suja, tem-se:

- Para $Q_{máx}$:

$$H_f = 1,43 * \frac{0,8^2 - (0,27)^2}{2 * 9,8}$$

$$H_f = 0,042 m$$

Conforme NBR 12209/2011, a perda de carga mínima para grades com limpeza manual deve ser 15 cm. Desse modo, será adotada uma perda de carga de 0,15 m.

Sendo assim, o comprimento da grade é dado pela Equação 11.

$$\text{comprimento grade} = \frac{h}{\operatorname{sen}\theta} \quad (11)$$

Onde:

\varnothing = Diâmetro da tubulação afluente = 0,2 m;

Folga adotada = 0,1 m;

θ = Ângulo de inclinação = 60°;

h = altura da grade (m).

Desse modo, é possível obter o valor da altura da grade a partir da Equação 12.

$$h = hmáx + Hf + \theta + \text{folga} \quad (12)$$

$$h = 0,042 + 0,15 + 60 + 0,1$$

$$h = 0,49 \text{ m}$$

Logo, temos que:

$$\text{comprimento grade} = \frac{0,49}{\operatorname{sen}60^\circ}$$

$$\text{comprimento grade} = 0,56 \text{ m}$$

5.2.2.2. Dimensionamento do Canal de Desarenação

Conforme a NBR 12209/2011 a vazão de dimensionamento do desarenador deve ser a vazão máxima afluente. Além de serem previstos pelo menos dois canais, sendo neste caso um deles reserva.

A largura da caixa de areia deve ser dimensionada de modo que a velocidade do fluxo não exceda o valor recomendado no projeto. Portanto, a largura da caixa de areia depende da vazão máxima, da altura da lâmina de esgoto e da velocidade de fluxo adotada. A equação utilizada para calcular a largura do desarenador é dada pela Equação 13.

$$b = \frac{Q_{máx}}{h_{máx} \times V_o} \quad (13)$$

Onde:

V_o = velocidade de escoamento do esgoto (m/s).

De acordo com a NBR 12209/2011 a velocidade de escoamento na seção transversal do desarenador deve estar entre 0,20 m/s e 0,40m/s para vazões máximas. Diante disso, foi adotada uma velocidade de escoamento de 0,30 m/s. Segundo Nunes (2001) velocidades abaixo de 0,15 m/s pode ocorrer a deposição de matéria. Já velocidades acima de 0,40 m/s é possível que haja arraste de areia.

Desse modo, temos que:

$$\begin{aligned} b &= \frac{0,0023}{0,042 \times 0,3} \\ b &= 0,18 \text{ m} \end{aligned}$$

Assim, será adotada uma largura de 0,30 m.

É fundamental assegurar que a velocidade de escoamento esteja em conformidade com a NBR 12209. Para isso, as velocidades foram verificadas considerando as vazões máximas e mínimas, utilizando a Equação 14.

$$V = \frac{Q}{b * h} \quad (14)$$

Desse modo, para as $V_{máx}$, $V_{méd}$ e $V_{mín}$, tem-se:

- Para $V_{máx}$:

$$\begin{aligned} V_{máx} &= \frac{0,0023}{0,30 \times 0,042} \\ V_{máx} &= 0,18 \text{ m/s} \end{aligned}$$

- Para $V_{mín}$:

$$V_{mín} = \frac{0,0012}{0,30 \times 0,021}$$

$$V_{mín} = 0,17 \text{ m/s}$$

- Para $V_{méd}$:

$$V_{méd} = \frac{0,0015}{0,30 \times 0,029}$$

$$V_{méd} = 0,18 \text{ m/s}$$

Tabela 7 - Tabela de verificação

	Q (m^3s)	h (m)	A = b·h (m^2)	v = Q/A (m/s)	
máx	0,0023	0,041	0,012	0,184	OK
méd	0,0015	0,029	0,009	0,178	OK
mín	0,0012	0,021	0,006	0,185	OK

Fonte: Autor (2025)

➤ Comprimento da caixa de areia (L)

Foi adotada uma caixa de areia convencional, caracterizada por um formato prismático de base retangular.

Segundo Pessoa e Jordão (2017), o desempenho da caixa de areia está diretamente relacionado ao comportamento do fluxo de esgoto na câmara de sedimentação. O transporte das partículas de areia depende da velocidade de sedimentação, considerando partículas com diâmetro inferior a 0,20 mm, densidade de 2,65 e velocidade de 0,02 m/s, além da velocidade crítica do fluxo longitudinal. Na prática, esse dimensionamento é realizado por meio da Equação 15.

$$L = f \times h_{máx} \quad (15)$$

Onde:

f = deslocamento das partículas.

Assim:

$$f = \frac{V_f}{V_s} \quad (16)$$

Na qual:

V_s = velocidade de sedimentação (m/s) = 0,02 (adotado);

V_f = velocidade máxima do fluxo (m/s) = 0,19.

Desse modo,

$$f = \frac{0,02}{0,19}$$

$$f = 9,5$$

Assim, tem-se o comprimento (L) obtido através da Equação 17.

$$L = f \times h_{\max} \quad (17)$$

$$L = 9,5 \times 0,042$$

$$L = 0,38 \text{ m}$$

Portanto, será adotado um comprimento de 0,40 m

- Verificação da taxa de escoamento superficial (I);

A área superficial da caixa de areia pode ser encontrada pela Equação 18.

$$I = \frac{Q_{\text{m\'ed}}}{A_s} \quad (18)$$

Onde:

I = taxa hidráulica superficial ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$);

A_s = área superficial da caixa de areia (m^2).

Portanto, temos:

$$I = \frac{0,0015 \times 86400}{0,5 \times 0,3}$$
$$I = 887,04 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$$

A NBR 12209/2011 informa que a taxa hidráulica superficial deve estar compreendida entre 600 e 1300 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$. Assim, o valor obtido encontra-se dentro da faixa recomendada.

A profundidade necessária para o acúmulo de material que sedimenta na caixa de areia no intervalo entre limpezas, é dada pela Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

$$H = \frac{Vacum}{As} \quad (19)$$

Onde:

$Vacum$ = volume de acumulação (m^3);

M = quantidade de material retido (m^3/dia);

i = frequência de limpeza (dias).

O volume acumulado é obtido através da Equação 19.

$$Vacum = M \times i \quad (20)$$

Sabe-se que, a quantidade de material retido é calculada pela taxa de produção de material retido (adotado) onde se tem o valor de $0,0004 \text{ m}^3/\text{m}^3$ pela vazão média ($0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$) assim tem-se um valor de $M = 0,0053 \text{ m}^3/\text{dia}$.

Ademais, adotando uma frequência de limpeza de 7 dias, tem -se o volume de acumulação igual a:

$$Vacum = 0,0053 \times 7$$

$$Vacum = 0,037 \text{ m}^3$$

Desse modo, tem-se uma altura útil de:

$$H = \frac{0,037}{0,5 \times 0,3}$$

$$H = 0,248 \text{ m}$$

Sendo adotada então uma altura (H) de 0,30 metros para um melhor funcionamento e eficiência do sistema.

5.2.2.3. Calha Parshall

Para a medição de vazão do efluente, foi selecionada uma Calha Parshall comercial de 1" que atende a vazão máxima ($Q_{\text{máx}} = 2,31 \text{ L/s}$), conforme a figura 8 apresentada abaixo. As vazões ($Q_{\text{mín}}$ e $Q_{\text{máx}}$) estão expressas em L/s. A largura da garganta (W) está em polegadas.

Figura 7 - Informações da Calha Parshall

(POL.)	W		M3/H		L/S	
	MÍNIMA	MÁXIMA	MÍNIMA	MÁXIMA		
1	0,40	20,41	0,11	5,67		
2	1,00	51,00	0,28	14,17		
3	2,88	193,68	0,80	53,80		
6	5,04	397,44	1,40	110,40		
9	9,00	907,30	2,55	252,02		
12	11,16	1.641,24	3,10	455,90		
18	15,12	2.507,76	4,20	696,60		
24	42,84	3.374,28	11,90	937,30		
36	62,28	5.137,92	17,30	1.427,20		
48	132,48	6.921,72	36,80	1.922,70		
60	163,08	8.726,04	45,30	2.423,00		
72	264,96	10.550,88	73,60	2.930,80		
84	306,00	12.375,72	85,00	3.437,70		
96	356,76	14.220,72	99,10	3.950,20		

Fonte: Digiflow

Figura 8 - Garganta da Calha Parshall

W EM POLEGADAS	DIMENSÕES EM CENTÍMETROS												Trecho Reto Centímetros		
	A	A1	B	C	D	E	T	G	K	N	M	X	Y		
1	36,3	24,2	35,6	9,3	16,7	25,0	7,6	20,3	1,9	2,9	-	0,8	1,3	142,0	142,0
2	41,4	27,6	40,6	13,5	21,5	30,5	11,4	25,4	2,2	4,3	-	1,6	2,5	142,0	142,0
3	46,7	31,1	45,7	17,8	25,9	61,0	15,2	30,5	2,5	5,7	30,5	2,5	3,8	243,8	243,8
6	62,1	41,4	61,0	39,4	39,6	61,0	30,5	61,0	7,6	11,4	30,5	5,0	7,6	304,8	304,8
9	87,9	58,7	86,4	38,1	57,5	76,2	30,5	45,7	7,6	11,4	30,5	5,0	7,6	365,7	365,7
12	137,2	91,4	134,3	61,0	84,5	91,4	61,0	91,4	7,6	22,9	38,1	5,0	7,6	365,7	365,7
18	144,8	96,5	141,9	76,2	102,5	91,4	61,0	91,4	7,6	22,9	38,1	5,0	7,6	365,7	365,7
24	152,4	101,6	149,5	91,4	120,6	91,4	61,0	91,4	7,6	22,9	38,1	5,0	7,6	365,7	365,7
36	167,6	111,8	164,5	121,9	157,2	91,4	61,0	91,4	7,6	22,9	38,1	5,0	7,6	365,7	365,7
48	182,9	121,9	179,4	152,4	193,7	91,4	61,0	91,4	7,6	22,9	45,7	5,0	7,6	365,7	365,7
60	198,1	132,1	194,3	182,9	230,2	91,4	61,0	91,4	7,6	22,9	45,7	5,0	7,6	365,7	365,7
72	213,4	142,3	209,2	213,4	266,7	91,4	61,0	91,4	7,6	22,9	45,7	5,0	7,6	365,7	365,7
84	228,6	152,4	224,1	243,8	303,2	91,4	61,0	91,4	7,6	22,9	45,7	5,0	7,6	365,7	365,7
96	243,8	162,6	239,1	274,3	339,7	91,4	61,0	91,4	7,6	22,9	45,7	5,0	7,6	365,7	365,7

Fonte: Digiflow

Para determinar as dimensões da calha Parshall, foi seguida uma sequência de equações, que incluiu o dimensionamento subsequente, juntamente com suas fórmulas correspondentes e os valores calculados.

- Altura da lâmina (H) para as vazões máximas:

$$H_{max} = \left(\frac{Q}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (21)$$

Onde:

Hmax: Altura da lâmina de água da seção de medição (m);

Q: Vazão de dimensionamento (m^3/s);

K: Medida tabelada;

n: Medida tabelada.

Substituindo os valores na equação 21:

$$Q_{max} = 0,0023 m^3/s$$

$$K = 1,9;$$

$$N = 2,9.$$

Temos:

$$H_{max} = \left(\frac{0,0023}{1,9} \right)^{\frac{1}{2,9}}$$

$$H_{max} \cong 0,10 m$$

➤ Altura da lâmina (H) para as vazões médias:

$$H_{med} = \left(\frac{Q}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (22)$$

Onde:

Hmed: Altura da lâmina de água da seção de medição (m);

Q: Vazão de dimensionamento (m^3/s);

K: Medida tabelada;

n: Medida tabelada;

Substituindo os valores na equação 22:

$$Q = 0,0015 m^3/s;$$

$$K = 1,9;$$

$$N = 2,9.$$

Temos:

$$H_{med} = \left(\frac{0,0015}{1,9} \right)^{\frac{1}{2,9}}$$

$$H_{med} \cong 0,08 m$$

➤ Altura da lâmina (H) para as vazões mínimas:

$$H_{min} = \left(\frac{Q}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (22)$$

Onde:

H_{min} : Altura da lâmina de água da seção de medição (m);

Q : Vazão de dimensionamento (m^3/s);

K : Medida tabelada;

n : Medida tabelada;

Substituindo os valores na equação 22:

$$Q = 0,00115 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$K = 1,9;$$

$$N = 2,9.$$

Temos:

$$H_{min} = \left(\frac{0,00115}{1,9} \right)^{\frac{1}{2,9}}$$

$$H_{min} \cong 0,07 \text{ m}$$

➤ Rebaixamento da garganta:

$$Z = \frac{Q_{max} * H_{min} - Q_{min} * H_{max}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (22)$$

Substituindo:

Q_{max} : 0,023 m^3/s ;

H_{min} : 0,06 m;

Q_{min} : 0,011 m^3/s ;

H_{max} : 0,1 m.

Temos:

$$Z = \frac{0,023 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 0,07 \text{ m} - 0,011 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * 0,10 \text{ m}}{0,023 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} - 0,011 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}$$

$$Z \cong 0,06 \text{ m}$$

- Altura máxima (h) da lâmina de água antes do rebaixamento.

$$h_{max} = H_{max} - Z \quad (23)$$

Sendo:

Hmax: Altura máxima da lâmina de água da seção de medição (m);

Z: Rebaixamento da garganta.

Substituindo na equação , temos que;

$$h_{max} = 0,10\text{ m} - 0,06\text{ m}$$

$$h_{max} = 0,04\text{ m}$$

- Altura média (h) da lâmina de água antes do rebaixamento:

$$h_{med} = H_{max} - Z \quad (24)$$

Sendo:

Hmed: Altura média da lâmina de água da seção de medição (m);

Z: Rebaixamento da garganta.

Substituindo na equação 24, temos que;

$$h_{med} = 0,08\text{ m} - 0,06\text{ m}$$

$$h_{med} = 0,02\text{ m}$$

- Altura mínima (h) da lâmina de água antes do rebaixamento:

$$h_{min} = H_{min} - Z \quad (25)$$

Sendo:

Hmin: Altura mínima da lâmina de água da seção de medição (m);

Z: Rebaixamento da garganta.

Substituindo na equação 25, temos que;

$$h_{min} = 0,07\text{ m} - 0,06\text{ m}$$

$$h_{min} = 0,01\text{ m}$$

5.2.2.4. Caixa Separadora de Gordura

Segundo José Alves Nunes, para líquidos acima dos 25° C, o tempo de detenção hidráulica deve ser de até 30 minutos.

➤ Volume da caixa

$$V = Q_{max} * t \quad (26)$$

Sendo:

Q_{max} : vazão máxima (m^3/h);

T: tempo de detenção hidráulica (h), adotando t: 10 min. $\cong 0,166$ h.

Substituindo:

$$\begin{aligned} V &= Q_{max} * t \\ V &= 8,24 * 0,166 \\ V &= 1,36 m^3 \end{aligned}$$

➤ Dimensionamento da caixa

Considerando que a velocidade de ascensão das menores partículas é de 4 mm/s, a taxa de aplicação (I) será de $14,4 m^3/m^3*h$.

$$A = \frac{Q_{max}}{I} \quad (27)$$

Sendo:

I : taxa de aplicação m^3/m^2*h ;

Q_{max} : vazão máxima de projeto m^3/h .

Substituindo, temos que:

$$\begin{aligned} A &= \frac{8,24 m^3/h}{14,4 \frac{m^3}{m^2} * h} \\ A &\cong 0,57 m^2 \end{aligned}$$

Adotando o valor de $0,60 m^2$

Comprimento (L) e Largura (B):

Adotando $L=1,5 B$

$$A = L * B \quad (28)$$

$$\begin{aligned} A &= 1,5 * B^2 \\ 0,60 m^2 &= 1,5 B^2 \end{aligned}$$

$$B \cong 0,65 \text{ m}$$

$$L = 1,5 * 0,65$$

$$L \cong 1,0 \text{ m}$$

Altura da Caixa (H):

$$V = L * B * H \quad (29)$$

$$H = \frac{V}{L * B}$$

$$H = \frac{1,36}{1,0 * 0,65}$$

$$H \cong 2,10 \text{ m}$$

5.2.2.5. Tanque de Equalização

➤ Volume de Equalização

Segundo José Alves Nunes, indústrias com atividades que não apresentem continuidade, em que seu tratamento físico-químico por coagulação-flocação precede sistema secundário biológico de lodos ativados, seu dimensionamento deverá ser feito pelo método de conservação das massas. Sua fórmula é apresentada a seguir.

$$V_{eq} = (Q_e - Q_s)t \quad (30)$$

Onde:

Q_e é a vazão de entrada;

Q_s é a vazão de saída;

t é o número de horas de funcionamento da indústria por dia.

Substituindo na Equação 30:

$$Q_s = \frac{Q_e * t}{24 h}$$

$$Q_s = \frac{8,24 \text{ m}^3 / \text{h} * 18 \text{ h}}{24 \text{ h}}$$

$$Q_s \cong 6,20 \text{ m}^3$$

$$V_{eq} = \left(8,24 \frac{m^3}{h} - 6,20 \frac{m^3}{h} \right) * 18h$$

$$V_{eq} = 36,72 m^3$$

➤ **Verificação do Tempo de Detenção (t)**

$$t = \frac{V_{eq}}{Q} \quad (31)$$

Sendo;

V_{eq} é o volume de equalização;

Q é a vazão de entrada.

Substituindo, temos que:

$$t = \frac{36,72 m^3}{8,24 m^3/h}$$

$$t = 4,45 h$$

➤ **Dimensões do Tanque**

$$V_{eq} = L^2 * H \quad (32)$$

Modificando a equação 32, podemos chegar à equação 33 e encontrar os valores para as dimensões do tanque.

$$L^2 = \frac{V_{eq}}{H} \quad (33)$$

Onde:

L é a largura da seção quadrada;

H é a profundidade adotada de 2,00 m.

Substituindo;

$$L^2 = \frac{36,72}{2}$$

$$L^2 = 18,36$$

$$L \cong 4,3 \text{ m}$$

Desta forma, o tanque terá as seguintes dimensões: 4,30 m * 4,30m * 2,0m.

➤ **Volume Total (Vt) do Tanque**

$$Vt = Veq + Vmin \quad (34)$$

Onde:

Vt é o volume total do tanque;

Veql é o volume de equalização;

Vmin é o volume mínimo cuja profundidade adotada é 1,00 m.

Substituindo;

$$Vt = 36,72 + 4,30 + 4,30 * 1,00 \text{ m}$$

$$Vt = 45,32 \text{ m}^3$$

➤ **Potência do Agitador**

Segundo José Alves Nunes, o agitador deverá ser um aerador flutuante.

$$P = \frac{Dp * Vt}{745} \quad (35)$$

Onde:

Dp é a densidade de potência adotada em 10 w/m³;

Substituindo, temos que:

$$P = \frac{10 \frac{w}{m^3} * 45,32 \text{ m}^3}{745}$$

$$P \cong 0,6 \text{ HP}$$

5.2.3. Tratamento Primário

5.2.3.1. Decantador Primário

A NBR 12209/2011 estabelece que a taxa de escoamento superficial deve ser igual ou inferior a $60 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$, quando o sistema não preceder de efluente biológico. Será adotado o valor de $40 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$.

A tabela apresenta as eficiências de remoção do decantador primário.

Tabela 8 - Eficiências de remoção no decantador primário

Parâmetro	Eficiência de remoção
DBO5	30%
SS	60%

Fonte: Von Sperling, 2016.

➤ Volume do Decantador

$$V = Q * TDH \quad (35)$$

Onde:

V corresponde ao volume do tanque m^3 ;

Q é a vazão média em m^3/h ;

TDH é o tempo de detenção hidráulico, valor adotado conforme NBR 12209/2011 de 1,5 h.

Substituindo, temos que:

$$V = 8,24 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} * 1,5 \text{ h}$$

$$V = 12,36 \text{ m}^3$$

➤ Área requerida

$$A = \frac{Q}{TAS} \quad (34)$$

Onde:

A corresponde a área requerida em m^2 ;

Q é a vazão média em m^3/dia ;

TAS é a taxa de aplicação superficial em $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$.

Substituindo, temos que:

$$A = \frac{100 \text{ m}^3/\text{dia}}{40 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2}/\text{dia}}$$

$$A = 2,5 \text{ m}^2$$

➤ **Diâmetro do Decantador**

$$D = 2 * \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (35)$$

Onde:

D corresponde ao diâmetro do tanque em m;

A é a área requerida em m².

Substituindo, temos que:

$$D = 2 * \sqrt{\frac{2,5}{\pi}}$$

$$D = 1,80 \text{ m}$$

➤ **Profundidade do reator**

$$V = \pi * R^2 * H \quad (36)$$

Isolando H:

$$H = \frac{V}{\pi * R^2}$$

V corresponde ao volume do tanque em m³;

R corresponde ao raio da circunferência do tanque.

Substituindo, temos que:

$$H = \frac{12,36}{\pi * (0,9)^2}$$

$$H \cong 4,85 \text{ m}$$

➤ **Concentração de DBO afluente ao reator**

$$DBO = Afluente \frac{(100 - eficiência\ de\ remoção)}{100} \quad (37)$$

$$DBO = Afluente * \frac{(100 - 30)}{100}$$

$$DBO = 430 \frac{mg}{L} * \frac{(100 - 30)}{100}$$

$$DBO = 430 \frac{mg}{L} * \frac{(100 - 30)}{100}$$

$$DBO = 301 mg/L$$

➤ **Eficiência do sistema na remoção de DBO**

$$E = (DBO_{afl} - DBO_{efl}) * 100 / DBO_{afl} \quad (38)$$

No sistema (decantador primário + etapa biológica):

$$\begin{aligned} E &= (430 - 20) * 100 / 430 \\ E &= 95,34 \% \end{aligned}$$

No etapa biológica:

$$\begin{aligned} E &= (301 - 20) * 100 / 301 \\ E &= 93,35 \% \end{aligned}$$

➤ **Concentração de SS afluente ao reator**

$$SST = Afluente \frac{(100 - eficiência\ de\ remoção)}{100} \quad (39)$$

$$SST = 226 mg / L * \frac{(100 - 60)}{100}$$

$$SST = 90,4 mg/L$$

5.2.3.2. Reator Aeróbio

➤ **Condições afluente ao sistema:**

- a) Vazão de projeto (Q): $Q = 5,55 \text{ m}^3/\text{h} = 100,0 \text{ m}^3/\text{d}$;
- b) Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) a 5 dias: $\text{DBO}_{\text{af}} = 301 \text{ mg/L} = 0,301 \text{ kgDBO/m}^3$;
- c) Sólidos Suspensos Totais (SSTaf): $\text{SST}_{\text{af}} = 90,4 \text{ mg/L}$;
- d) Nitrogênio orgânico e amoniacial: O parâmetro Nitrogênio Amoniacial apresentou valor de 15,40 mg/L. Foi adotado um valor típico para indústria de processamento de aves, segundo Del Pozo, R., & Diez, V. (2005). $\text{NTK} = 100 \text{ mgNTK/L} = 10 \text{ kgNTK/d}$.

➤ **Parâmetros de projeto para sistema de lodos ativados na modalidade convencional:**

- e) Idade de lodo (IL): $\text{IL} = 10 \text{ d}$;
- f) Concentração de Sólidos Suspensos Voláteis (SSV): $X_v = 2,5 \text{ kgSSV/m}^3$;
- g) DBO solúvel efluente ao sistema: $\text{DBO}_{\text{se}} = 20 \text{ mg/L}$;
- h) Sólidos Suspensos Totais (SST) efluente ao sistema (X_e): $X_e = 30 \text{ mg/L}$;
- i) Temperatura média do mês mais frio: $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- j) Razão de recirculação: $R = 1$;
- k) Fração de amônio no lodo excedente: $f_{\text{NH3}} = 0,10 \text{ gN/gSSV}$;

➤ **Parâmetros cinéticos do sistema:**

- l) Coeficiente de produção celular: $Y = 0,60 \text{ gSSV/gDBO}$;
- m) Coeficiente de respiração endógena: $K_d = 0,08 \text{ d}^{-1}$;
- n) Fração biodegradável ao gerar sólidos: $f_b' = 0,80 \text{ gSSVb/gSSV}$;
- o) Rel. oxigênio por sólido biodegradável cons.: $\text{DBO}_u/X_b = 1,42 \text{ gDBO}_u/\text{SS}_b$;
- p) Relação DBO última e DBO 5 dias: $\text{DBO}_u/\text{DBO} = 1,46 \text{ gDBO}_u/\text{gDBO}$;
- q) Relação SSV/SS na idade de lodo: $\text{SSV}/\text{SS}_{\text{IL}} = 0,70 \text{ gSSVTA/gSSTA}$;
- r) Relação SS_b/SSV: $\text{SS}_b/\text{SSV}_{\text{af}} = 0,60 \text{ gSS}_b/\text{gSSV}$;
- s) Relação SSV/SS no efluente bruto: $\text{SSV}/\text{SS}_{\text{af}} = 0,70 \text{ gSSV/gSS}$;
- t) Relação SSV/SS na geração de sólidos: $\text{SSV}/\text{SS}_{\text{gs}} = 0,90 \text{ gSSV/gSS}$;

- u) Coeficiente estequiométrico de demanda de O₂ para nitrificação: 4,57 KgO₂/KgNTK.

Concentração de SSV efluente ao sistema (X_{vef}):

$$X_{vef} = X_{ef} \times (SSV/SSIL) / 1000 \quad (40)$$

$$X_{vef} = 30 \times 0,70 / 1000$$

$$X_{vef} = 0,021 \text{ kgSSVTA/m}^3$$

Correção de Kd para a temperatura de projeto:

$$Kd(T = 25^\circ\text{C}) = Kd \times 1,07(T - 20) \quad (41)$$

$$0,08 \times 1,07(25 - 20)$$

$$Kd(T = 25^\circ\text{C}) = 0,11 d - 1$$

Cálculo de fb:

$$fb = fb' / [1 + (1 - fb') \times Kd \times IL] \quad (42)$$

$$0,80 / [1 + (1 - 0,80) \times 0,11 \times 10]$$

$$fb = 0,65 \text{ gSSVb/gSSV}$$

Concentração de sólidos biodegradáveis no efluente ao sistema (X_{bef}):

$$X_{bef} = fb \times X_{vef} \quad (43)$$

$$X_{bef} = fb \times X_{vef}$$

$$0,65 \times 0,021$$

$$X_{bef} = 0,014 \text{ kg SSb/m}^3$$

DBO em suspensão do efluente ao sistema (DBOsusp):

$$DBOsusp = X_{bef} \times (DBOu/Xb) / (DBOu/DBO) \quad (44)$$

$$0,014 \times 1,42 / 1,46$$

$$DBOsusp = 0,0133 \text{ kgDBOsusp/m}^3$$

DBO solúvel efluente máxima obtida (DBOsolef):

$$DBOsolef = DBOse - DBOsusp \times 1000 \quad (45)$$

$$20 - 0,0133 \times 1000$$

$$DBOsolef = 16,7 \text{ mg/L}$$

Carga orgânica removida do reator (Sr):

$$Sr = Q \times (DBOaf - DBOsolef) / 1000 \quad (46)$$

$$100 \times (301 - 16,7) / 1000$$

$$Sr = 28,43 \text{ kgDBO/d}$$

Volume do reator aeróbio (V):

$$V = Sr \times Y \times IL / [Xv \times (1 + fb \times Kd \times IL)] \quad (47)$$

$$V = 28,43 \times 0,60 \times 10 / [3,0 \times (1 + 0,65 \times 0,11 \times 10)]$$

$$V = 33,15 \text{ m}^3$$

Adotando altura útil do reator (H):

$$H = 4,5 \text{ m}$$

Área superficial do reator aeróbio (A):

$$A = V / H \quad (48)$$

$$A = V / H$$

$$A = 33,15 / 4,5$$

$$A = 7,36 \text{ m}^2$$

Diâmetro teórico (D):

$$D = 2 \times \sqrt{(A/\pi)} \quad (49)$$

$$D = 2 \times \sqrt{(7,36/\pi)}$$

$$D = 3,00 \text{ m}$$

Tempo de detenção hidráulica (TDH):

$$t = V/Q \quad (50)$$

$$t = 33,15/100$$

$$t = 0,33 \text{ d} = 7,92 \text{ h}$$

Cálculo da relação alimento/microrganismo (A/M):

$$A/M = (DBOaf \times Q) / (Xv \times V) \quad (51)$$

$$A/M = 301 \times 100 / (3000 \times 33,15)$$

$$A/M = 0,3 \text{ kgDBO/kgSSVTA.d}$$

Verificações de SSV/SS e SS/Sr para o reator corrigido:

$$SSV/SS = 1,07 / 1,59 \quad (52)$$

$$SSV/SS = 1,07 / 1,59$$

$$SSV/SS = 0,67 \text{ kgSSV/kgSST}$$

$$SS/Sr = 1,59 / 1,76$$

$$SS/Sr = 0,91 \text{ kgSST/kgDBO}$$

Carga de sólidos efluente ao sistema (CSSTef):

$$CSS = Q \times SS \quad (53)$$

$$CSS = Q \times SS$$

$$CSS = 100 \times 0,030$$

$$CSS = 3 \text{ kgSS/d}$$

Carga de sólidos a serem removidos do sistema (CSSTrem):

$$CSSTrem = Px - CSSTef \quad (54)$$

$$CSSTrem = 1,59 - 3,0$$

$$CSSTrem = 0,87 \text{ kgSST/d}$$

Concentração de sólidos na linha recirculação de lodo (SSLR):

$$SSLR = Xv / (SSV/SSIL) \times (1 + 1/R) \quad (55)$$

$$SSLR = Xv / (SSV/SSIL) \times (1 + 1/R)$$

$$SSLR = 3,0 / 0,70 \times (1 + 1/1)$$

$$SSLR = 2,14 \text{ kgSST/m}^3$$

Volume de lodo excedente a ser retirado (Qex):

$$Qex = CSSTrem / SSLR \quad (56)$$

$$Qex = 0,87 / 2,14$$

$$Qex = 0,40 \text{ m}^3/d$$

Sólidos em suspensão voláteis formados (Pxv):

$$Pxv = Y * Sr \quad (57)$$

$$Pxv = 0,6 * 28,43$$

$$Pxv = 17,05 \text{ KgSSV/d}$$

Sólidos em suspensão totais formados (Pxt):

$$Pxt = Pxv / (\frac{SSV}{SS}) \quad (58)$$

$$Pxt = 17,05 / 0,67$$

$$Pxt = 25,44 \text{ KgSS/d}$$

Sólidos em suspensão inorgânicos formados (Pxi):

$$Pxi = Pxformados - Pxvformados \quad (59)$$

$$Pxi = 25,44 - 17,05$$

$$Pxi = 8,39 \text{ KgSSI/d}$$

Sólidos em suspensão biodegradáveis formados (Pxb):

$$Pxb = fb * P xv \text{ formados} \quad (60)$$

$$Pxb = 0,65 * 17,05$$

$$Pxb = 11,08 \text{ KgSSb/d}$$

Sólidos em suspensão não biodegradáveis formados (Pxnb):

$$Pxnb = Pxv \text{ formados} - Pxb \text{ formados} \quad (61)$$

$$Pxnb = 17,05 - 11,08$$

$$Pxnb = 5,97 \text{ KgSSnb/d}$$

Sólidos em suspensão biodegradáveis destruídos na respiração endógena (Pxbd):

$$Pxbd = Pxb \text{ formados} * (kd * \theta c) / (1 + fb * Kd * \theta c) \quad (62)$$

$$Pxbd = 11,08 * (0,11 * 10) / (1 + 0,65 * 0,11 * 10)$$

$$Pxbd = 7,10 \text{ KgSSb/d}$$

Sólidos em suspensão biodegradáveis remanescentes (Pxb líquida):

$$Pxb \text{ líquida} = Pxb \text{ formados} - Pxb \text{ destruídos} \quad (63)$$

$$Pxb \text{ líquida} = 11,08 - 7,10$$

$$Pxb \text{ líquida} = 3,98 \text{ KgSSb/d}$$

Sólidos em suspensão voláteis remanescentes (Pxv líquida):

$$Pxv \text{ líquida} = Pxb \text{ líquida} + Pxnb \text{ formados} \quad (64)$$

$$Pxv \text{ líquida} = 3,98 + 5,97$$

$$Pxv \text{ líquida} = 9,95 \text{ KgSSV/d}$$

Remoção de lodo excedente:

$$SS \text{ total produzido (afluente + produzido no reator)} = Pxi + Pvx \quad (65)$$

$$S \text{ total produzido (afluente + produzido no reator)} = 8,39 + 17,05$$

$$SS \text{ total produzido (afluente + produzido no reator)} = 25,44 \text{ kg SS/d}$$

Concentração de sólidos a serem removidos:

$$SS \text{ a ser removido no sistema} = SS \text{ total} - SS \text{ efluente} \quad (66)$$

$$SS \text{ a ser removido no sistema} = 25,44 - 3,0$$

$$SS \text{ a ser removido no sistema} = 22,44 \text{ kgSS/d}$$

a) Opção: remoção diretamente do reator.

$$\text{Concentração (SSTA)} = SSVTA / (SSV/SS) \quad (67)$$

$$\text{Concentração (SSTA)} = 3.000 / 0,67$$

$$\text{Concentração (SSTA)} = 4.447 \text{ mg/L}$$

$$\text{Volume a ser removido por dia (Qex)} = \text{Carga} / \text{Concentração} \quad (68)$$

$$\text{Volume a ser removido por dia (Qex)} = 22,44 * 1000 / 4.447$$

$$\text{Volume a ser removido por dia (Qex)} = 5,04 \text{ m}^3/\text{d}$$

b) Opção: remoção da linha de recirculação de lodo.

$$\text{Concentração (SSLR)} = SSTA * (1 + \frac{1}{R}) \quad (69)$$

$$\text{Concentração (SSLR)} = 4.477 * (1 + \frac{1}{1})$$

$$\text{Concentração (SSLR)} = 4.477 * 2$$

$$\text{Concentração (SSLR)} = 8.894 \text{ mg/L}$$

$$Volume a ser removido por dia (Qex) = Carga / Concentração \quad (70)$$

$$Volume a ser removido por dia (Qex) = 22,44 * 1000 / 8.894$$

$$Volume a ser removido por dia (Qex) = 2,52 m^3/d$$

Nitrificação (assumindo 100% de eficiência no processo):

$$Carga de NTK no lodo excedente = 0,1 * P_{xv} líquida \quad (71)$$

$$Carga de NTK no lodo excedente = 0,1 * 9,95$$

$$Carga de NTK no lodo excedente = 0,995 KgNTK/d$$

$$\begin{aligned} & Carga de NTK a ser oxidada \\ & = carga de NTK afluente - Carga de NTK lodo excedente \quad (72) \end{aligned}$$

$$Carga de NTK a ser oxidada = 10 - 0,995$$

$$Carga de NTK a ser oxidada = 9,005 KgNTK/d$$

Demandas de oxigênio:

$$Demanda de O_2 para nitrificação = 4,57 * 9,005$$

$$Demanda de O_2 para nitrificação = 41,15 KgO_2/d$$

Requisitos de Oxigênio:

$$a' = (DBO_u/DBO_5) - (DBO_u/X_b) * Y \quad (73)$$

$$a' = 1,46 - 1,42 * 0,6$$

$$a' = 0,608 KgO_2/KgDBO_5$$

$$b' = (DBO_u/X_b) * f_b * K_d$$

$$b' = 1,42 * 0,65 * 0,11$$

$$b' = 0,10 KgO_2/d$$

$$\text{Demanda para a síntese} = a' * Sr \quad (74)$$

$$\text{Demanda para a síntese} = 0,608 * 28,43$$

$$\text{Demanda para a síntese} = 17,28 \text{ KgO}_2/\text{d}$$

$$\text{Demanda para a respiração endógena} = b' * Xv * V \quad (75)$$

$$\text{Demanda para a respiração endógena} = 0,10 * 3000 * (33,15/1000)$$

$$\text{Demanda para a respiração endógena} = 9,945 \text{ KgO}_2/\text{d}$$

Aeração por ar difuso:

$$Qar = \frac{\text{TTD padrão (soma das demandas de O}_2)}{\text{massa específica do ar} * \text{fração O}_2 \text{ no ar}} \quad (76)$$

$$Qar = \frac{68.375 \text{ kgO}_2/\text{d}}{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,23 \text{ g O}_2/\text{g ar}}$$

$$Qar = 247.735 \text{ m}^3\text{ar/d}$$

Quantidade de ar real, para uma eficiência de 15%:

$$Qar \text{ real} = Qar / \text{eficiência} \quad (77)$$

$$Qar \text{ real} = 247,735 / 0,15$$

$$Qar \text{ real} = 1.651,57 \text{ m}^3\text{ar/d}$$

Quantidade de ar a ser adotada com coeficiente de segurança de 1,5:

$$Qar \text{ adotada} = Qar \text{ real} * 1,5 \quad (78)$$

$$Qar \text{ adotada} = 2,477,350 \cdot \frac{\text{m}^3\text{ar}}{\text{d}}$$

5.2.3.3. Decantador Secundário

Coeficiente de sedimentabilidade (média/ruim):

$$V_o = 7,40 \text{ m/h};$$

$$K = 0,59 \text{ m}^3/\text{kg};$$

$$M = 7,34;$$

$$n = 0,71.$$

Q/A para o critério de clarificação:

$$\frac{Q}{A} = V_o * e^{-k*c} \quad (79)$$

$$\frac{Q}{A} = 7,40 * e^{-0,59*4,447}$$

$$\frac{Q}{A} = 0,53 \text{ m/h}$$

Q/A para o critério de adensamento:

$$Q/A = \frac{m * [R * V_o * e^{-k*c}]^n}{(R + 1) * Co} \quad (80)$$

$$Q/A = \frac{7,34 * [1 * 7,40 * e^{-0,59*4,447}]^{0,71}}{(1 + 1) * 4,447}$$

$$\frac{Q}{A} = 0,53 \text{ m/h}$$

Desse modo, temos que:

$$A = Q (\text{m}^3/\text{h}) / 0,53 (\text{m/h}) \quad (81)$$

$$A = Q (\text{m}^3/\text{h}) / 0,53 (\text{m/h})$$

$$A = 5,55 (\text{m}^3/\text{h}) / 0,53 (\text{m/h})$$

$$A = 2,95 \text{ m}^2$$

Diâmetro do decantador:

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi}} \quad (82)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 2,95}{\pi}}$$

$$D = 1,93 \text{ m}$$

Diâmetro adotado de 2,0 m.

$$\text{Área resultante do decantador} = \pi * \frac{D^2}{4} \quad (83)$$

$$\text{Área resultante do decantador} = \pi * \frac{D^2}{4}$$

$$\text{Área resultante do decantador} = \pi * \frac{2^2}{4}$$

$$\text{Área resultante do decantador} = 3,14 \text{ m}^2$$

Taxas de aplicações resultantes:

- Taxa de aplicação superficial resultante com Qmed;

$$TAH = Qmed/A \quad (84)$$

$$TAH = Qmed/A$$

$$TAH = 5,55/3,14$$

$$TAH = 1,74 \text{ m}^3/\text{m}^2 * h$$

- Taxa de aplicação superficial resultante com Qmax;

$$TAH = Qmax/A \quad (85)$$

$$TAH = 8,325/3,14$$

$$TAH = 2,65 \text{ m}^3/\text{m}^2 * h$$

- Taxa de aplicação de sólidos resultante com Qmed;

$$TAS = (Q + Qr) * X/A \quad (86)$$

$$TAS = (5,55 + 5,55) * 4,447/3,14$$

$$TAS = 15,72 \text{ kgSS/m}^2/\text{h}$$

- Taxa de aplicação de sólidos resultante com Qmax;

$$TAS = (Q + Qr) * X/A$$

$$TAS = (8,325 + 5,5) * 4,447/3,14$$

$$TAS = 19,65 \text{ kgSS/m}^2/\text{h}$$

Profundidade lateral (parte cilíndrica); H= 3,5 adotada;

Declividade de fundo =12% (1/12) adotada;

Profundidade da parte cônica do tanque:

$$Hcone = (D/2) * (declividade/100) \quad (87)$$

$$Hcone = (2/2) * (12/100)$$

$$Hcone = 0,12 \text{ m}$$

Volume do decantador:

$$V = A * (H + Hcone/3) \quad (88)$$

$$V = 3,14 * (3,5 + 0,12/3)$$

$$V = 11,11 \text{ m}^3$$

Tempo de detenção hidráulica:

- Para a vazão média + recirculação:

$$t = V / (Q + Qr) \quad (89)$$

$$t = 11,11 / (5,55 + 5,55)$$

$$t = 1 \text{ h}$$

- Para a vazão máxima + recirculação:

$$t = V / (Q + Qr)$$

$$t = 11,11 / (8,325 + 5,55)$$

$$t = 0,8 \text{ h}$$

5.2.3.4. Coagulação

5.2.3.4.1. Volume do Tanque

$$V = Q \left(\frac{m^3}{h} \right) * t(h) \quad (90)$$

Onde:

t é o tempo de detenção adotado em 1 min.

Q é a vazão média.

Substituindo, temos que:

$$V = 5,55 \left(\frac{m^3}{h} \right) * \frac{1}{60} (h)$$

$$V \cong 0,90 \text{ m}^3$$

5.2.3.4.2. Dimensões

$$V = L^2 * H$$

Adotando $H = 1,5 \text{ L}$

$$0,90 \text{ m}^3 = L^2 * 1,5$$

$$L \cong 0,6 \text{ m}$$

$$H = 1,5 * 0,6$$

$$H = 0,9 \text{ m}$$

As dimensões úteis serão $0,6 \text{ m} \times 0,6 \text{ m} \times 0,9 \text{ m}$.

5.2.3.4.3. Potência do Misturador

$$P = \frac{\mu * V * G^2}{76} \quad (91)$$

Onde:

μ é a viscosidade absoluta do líquido a 20º C igual a $1,029 \times 10^{-4}$ kgf.s/m²;

V é o volume do tanque em m³;

G é o gradiente de velocidade adotado em 1000 s⁻¹.

Substituindo, temos que:

$$P = \frac{1,029 \times 10^{-4} * 0,9 * 1000^2}{76}$$

$$P = 1,21 \text{ HP}$$

Com acréscimo de 50% e a folga recomendada, fazendo com que o motor trabalhe com 80% da potência nominal, a potência instalada será então:

$$P = \frac{1,5 * 1,21}{0,80}$$

$$P \cong 2,26 \text{ HP}$$

5.2.3.5. Floculação Mecânica

5.2.3.5.1. Volume do tanque

$$V = Q \left(\frac{m^3}{h} \right) * t(h)$$

Onde;

t é o tempo de detenção adotado em 30 min.

Q é a vazão.

Substituindo, temos que:

$$V = 5,55 \left(\frac{m^3}{h} \right) * 0,5(h)$$

$$V = 2,775 \text{ m}^3$$

5.2.3.5.2. Dimensões do tanque

$$V = L^2 * H$$

Adotando $H = 1,5 \text{ L}$

$$2,775 \text{ m}^3 = L^2 * 1,5$$

$$L \cong 1,85 \text{ m}$$

Adotar $L = 1,90 \text{ m}$

$$H = 1,5 * 1,9$$

$$H = 2,85 \text{ m}$$

As dimensões úteis serão $1,9 \text{ m} \times 1,9 \text{ m} \times 2,85 \text{ m}$.

5.2.3.5.3. Potência do floculador

$$P = \frac{\mu * V * G^2}{76}$$

Onde:

μ é a viscosidade absoluta do líquido a 20° C igual a $1,029 \times 10^{-4} \text{ kgf.s/m}^2$;

V é o volume do tanque em m^3 ;

G é o gradiente de velocidade adotado em 40 s^{-1} .

Substituindo;

$$P = \frac{1,029 \times 10^{-4} * 2,775 * 40^2}{76}$$

$$P = 0,45 \text{ HP}$$

Com acréscimo de 50% e a folga recomendada, fazendo com que o motor trabalhe com 80% da potência nominal, a potência instalada será então:

$$P = \frac{1,5 * 0,45}{0,80}$$

$$P \cong 0,85 \text{ HP}$$

É indicado usar o floculador de potência imediatamente superior.

5.2.3.6. Decantador

5.2.3.6.1. Volume do Decantador

$$V = Q * TDH \quad (92)$$

Onde:

V corresponde ao volume do tanque m³;

Q é a vazão média em m³/h;

TDH é o tempo de detenção hidráulico, valor adotado conforme NBR 12209/2011 de 1,5 h.

Substituindo, temos que:

$$V = 8,24 \frac{m^3}{h} * 1,5 \text{ h}$$

$$V = 12,36 \text{ m}^3$$

5.2.3.6.2. Área requerida

$$A = \frac{Q}{TAS} \quad (93)$$

Onde:

A corresponde a área requerida em m²;

Q é a vazão média em m³/dia;

TAS é a taxa de aplicação superficial em m³/m²/dia.

Substituindo, temos que:

$$A = \frac{100 \text{ m}^3/\text{dia}}{40 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2}/\text{dia}}$$

$$A = 2,5 \text{ m}^2$$

5.2.3.6.3. Diâmetro do Decantador

$$D = 2 * \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

Onde:

D corresponde ao diâmetro do tanque em m;

A é a área requerida em m^2 .

Substituindo, temos que:

$$D = 2 * \sqrt{\frac{2,5}{\pi}}$$

$$D = 1,80 \text{ m}$$

5.2.3.6.4. Profundidade do reator

$$V = \pi * R^2 * H$$

Isolando H:

$$H = \frac{V}{\pi * R^2}$$

V corresponde ao volume do tanque em m^3 ;

R corresponde ao raio da circunferência do tanque.

Substituindo, temos que:

$$H = \frac{12,36}{\pi * (0,9)^2}$$

$$H \cong 4,85 \text{ m}$$

5.2.3.7. Filtração

O sistema de filtração ocorrerá em duas etapas sequenciais: filtro de areia e antracito seguida pela filtração em leito de carvão ativado O filtro deve suportar a pressão de operação do sistema. Deve-se verificar a perda de carga gerada pelo filtro, que não deve comprometer o desempenho da bomba pressurizadora.

Filtros de carvão ativado: Para remoção de cloro, matéria orgânica e odores. Filtros de areia ou multimeios: Para remoção de sólidos suspensos, ferro e turbidez.

Velocidade de filtração (Vf): Recomendada entre 8 e 15 m³/m².h para água de abastecimento e até 25 m³/m².h para efluentes industriais (Metcalf & Eddy, 2014) e a Perda de carga inicial e final: Normalmente entre 0,2 e 0,7 mca (AWWA, 2011).

Vazão de projeto (Q):

$$Q = 5,55 \text{ m}^3/\text{h}$$

Premissas adotadas:

Adoção de tanque pulmão de filtração

Filtração em leito de dupla camada – areia e antracito;

Taxa de filtração do filtro de areia e antracito (Tfaa): Tf = 10 m³/m²h;

Taxa de filtração do filtro de carvão ativado (Tfca): Tfca = 15 m³/m²h

Área de filtração do filtro de areia e antracito (Af):

$$Af = Q / Tf = 5,55 / 10$$

$$Af = 0,55 \text{ m}^2$$

Diâmetro teórico do filtro (D):

$$D = 2 * \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$D = 2 * \sqrt{\frac{0,55}{\pi}}$$

$$D = 0,84 = 840 \text{ mm}$$

A seleção dos materiais deve seguir normas técnicas e recomendações de órgãos reguladores, como a American Water Works Association (AWWA) e as diretrizes de engenharia sanitária e ambiental. O sistemas de filtração pressurizados é essencial para garantir a eficiência na remoção de partículas suspensas e turbidez em estações de tratamento.

O filtro de areia foi dimensionado em três camadas de materiais granulares com diferentes granulometrias, desempenhando funções específicas no processo de filtração. A altura total do meio filtrante pode variar entre 0,8 m e 1,5 m, dependendo da aplicação e da qualidade da água bruta a ser tratada.

As camadas são:

amada de Suporte (Pedregulho): Com granulometria entre 2 mm e 4 mm, esta camada sustenta as camadas superiores e garante a distribuição uniforme do fluxo de água no sistema.

Camada Intermediária (Areia Média): Com partículas variando entre 0,6 mm e 1,2 mm, esta camada atua como um gradiente de transição, evitando que materiais finos da camada superior migrem para a camada de suporte.

Camada Superior (Areia Fina): Com granulometria entre 0,35 mm e 0,55 mm, esta camada é responsável por reter partículas finas, reduzindo a turbidez da água e removendo sólidos suspensos menores.

Taxa de Retrolavagem

O filtro de areia requer retrolavagem periódica para remover partículas retidas. A taxa de retrolavagem é definida entre 30 e 50 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ para expandir a camada filtrante em 30-50% (Metcalf & Eddy, 2014).

A vazão de retrolavagem (Q_r) é calculada por:

$$Q_r = A_f \times V_r$$

Considerando $V_r=40$

$$V_r = 40 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$$

$$Q_r = 0,55 \times 40 = 22,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

5.2.3.8. Desinfecção

Segundo a ABNT 12216 a dosagem ideal de hipoclorito de sódio para efluente tratado para reuso ou lançamento é de 3 a 5 mg/L. Será adotado uma dosagem de 5mg/L, para fins de projeto.

A desinfecção ocorrerá em um tanque de contato por meio da dosagem de hipoclorito de sódio. Será adotado reservatório tanque comercial de 3,00 L.

$$V = 3,0 \text{ m}^3$$

O tempo de detenção mínimo recomendado é da ordem de 30 min. O tempo de detenção no tanque de contato (t) é:

$$t = V / Q = 3,0 / 5,55$$

$$t = 0,54 \text{ h ou } 32,4 \text{ min}$$

5.2.3.9. Desaguamento de Lodo

O desaguamento do lodo é uma etapa fundamental no tratamento de efluentes, pois reduz o volume do resíduo e facilita sua destinação final. Tradicionalmente, o leito de secagem tem sido utilizado como uma solução simples e de baixo custo para a remoção da umidade do lodo. No entanto, essa alternativa apresenta desafios significativos, especialmente em áreas urbanas ou em instalações com restrições de espaço e controle ambiental.

Um dos principais problemas do leito de secagem é a geração de mau odor, especialmente quando o lodo possui alta carga orgânica e sofre processos de decomposição aeróbia e anaeróbia durante a secagem. Esse odor pode causar incômodo significativo às comunidades próximas e dificultar a operação da estação de tratamento de efluentes (ETE), exigindo medidas adicionais para controle de odores, como coberturas ou tratamentos químicos.

Além disso, os leitos de secagem demandam grandes áreas, pois o processo de evaporação natural da umidade do lodo ocorre de forma lenta, sendo influenciado por fatores climáticos como temperatura, umidade relativa do ar e precipitação. Em regiões onde o espaço é limitado, a implantação de leitos de secagem pode ser inviável, tornando necessário o uso de tecnologias mais compactas e eficientes.

Desta forma, será utilizada uma centrífuga de lodo industrial dimensionada para atender à vazão do lodo gerado nos reatores, garantindo um processo eficiente de separação entre a fração sólida e líquida. A centrifugação permitirá a redução do volume e do teor de umidade do lodo, facilitando seu manuseio e transporte. Após o desaguamento, o lodo

desidratado será devidamente acondicionado e encaminhado para um aterro sanitário licenciado, em conformidade com as normas ambientais vigentes, assegurando uma destinação final adequada e segura.

5.2.4. Avaliação da Eficiência do Sistema Proposto

A presente avaliação tem como objetivo analisar a eficiência do sistema de tratamento de efluentes proposto, composto por gradeamento, desarenação, decantação primária, lodos ativados convencionais, coagulação com policloreto de alumínio, floculação com polímero aniónico, decantação secundária, filtração em leito de antracito e areia, filtro de carvão ativado e desinfecção com cloro. O estudo se baseia na metodologia de Von Sperling (2016), que fornece eficiências típicas para cada etapa do tratamento, permitindo a estimativa da remoção de DBO, DQO, SS e NTK ao longo do processo.

Além da avaliação da eficiência de remoção, os resultados foram comparados com os padrões de lançamento em corpos hídricos estabelecidos pela Resolução COEMA 02/2017, garantindo que os parâmetros finais do efluente tratado atendam aos limites exigidos para descarte ambiental. Esse enquadramento normativo é fundamental para assegurar a conformidade legal e minimizar os impactos ambientais do efluente tratado.

Será utilizado as eficiências de remoção propostas por Von Sperling (2005) para cada etapa.

Fórmula para calcular a concentração após cada etapa:

$$\text{Valor Final} = \text{Valor Inicial} - (\text{Valor Inicial} * \text{Eficiência})$$

i. Decantação Primária

Eficiências aplicadas:

- DBO: 35% → 0.35
- DQO: 25% → 0.25
- SS: 55% → 0.55
- NTK: 12.5% → 0.125

Cálculos:

$$\text{DBO Final} = 430 - (430 \times 0.35)$$

$$DBO\ Final = 430 - 150.5$$

$$DBO\ Final = 279.5\ mg/L$$

$$DQO\ Final = 1307.7 - (1307.7 \times 0.25)$$

$$DQO\ Final = 1307.7 - 326.93$$

$$DQO\ Final = 980.77\ mg/L$$

$$SS\ Final = 226 - (226 \times 0.55)$$

$$SS\ Final = 226 - 124.3$$

$$SS\ Final = 101.7\ mg/L$$

$$NTK\ Final = 15.4 - (15.4 \times 0.125)$$

$$NTK\ Final = 15.4 - 1.925$$

$$NTK\ Final = 13.475\ mg/L$$

ii. Lodos Ativados

Eficiências aplicadas:

- DBO: 90% → 0.90
- DQO: 75% → 0.75
- SS: 90% → 0.90
- NTK: 30% → 0.30

Cálculos:

$$DBO\ Final = 279.5 - (279.5 \times 0.90)$$

$$DBO\ Final = 279.5 - 251.55$$

$$DBO\ Final = 27.95\ mg/L$$

$$DQO\ Final = 980.77 - (980.77 \times 0.75)$$

$$DQO\ Final = 980.77 - 735.58$$

$$DQO\ Final = 245.19\ mg/L$$

$$SS\ Final = 101.7 - (101.7 \times 0.90)$$

$$SS\ Final = 101.7 - 91.53$$

$$SS\ Final = 10.17\ mg/L$$

$$NTK\ Final = 13.475 - (13.475 \times 0.30)$$

$$NTK\ Final = 13.475 - 4.0425$$

$$NTK\ Final = 9.4325\ mg/L$$

iii. Coagulação + Floculação + Decantação

Eficiências aplicadas:

- DBO: 10% → 0.10
- DQO: 15% → 0.15
- SS: 20% → 0.20
- NTK: 10% → 0.10

Cálculos:

$$DBO\ Final = 27.95 - (27.95 \times 0.10)$$

$$DBO\ Final = 27.95 - 2.795$$

$$DBO\ Final = 25.155\ mg/L$$

$$DQO\ Final = 245.19 - (245.19 \times 0.15)$$

$$DQO\ Final = 245.19 - 36.78$$

$$DQO\ Final = 208.41\ mg/L$$

$$SS\ Final = 10.17 - (10.17 \times 0.20)$$

$$SS\ Final = 10.17 - 2.034$$

$$SS\ Final = 8.136\ mg/L$$

$$NTK\ Final = 9.4325 - (9.4325 \times 0.10)$$

$$NTK\ Final = 9.4325 - 0.94325$$

$$NTK\ Final = 8.48925\ mg/L$$

iv. Filtração (Areia + Antracito + Carvão)

Eficiências aplicadas:

- DBO: 10% → 0.10
- DQO: 20% → 0.20
- SS: 95% → 0.95
- NTK: 10% → 0.10

Cálculos:

$$DBO\ Final = 25.155 - (25.155 \times 0.10)$$

$$DBO\ Final = 25.155 - 2.5155$$

$$DBO\ Final = 22.6395\ mg/L$$

$$DQO\ Final = 208.41 - (208.41 \times 0.20)$$

$$DQO\ Final = 208.41 - 41.68$$

$$DQO\ Final = 166.73\ mg/L$$

$$SS\ Final = 8.136 - (8.136 \times 0.95)$$

$$SS\ Final = 8.136 - 7.7292$$

$$SS\ Final = 0.4068\ mg/L$$

$$NTK\ Final = 8.48925 - (8.48925)$$

$$NTK\ Final = 8.48925 - 0.848925$$

$$NTK\ Final = 7.6403\ mg/L.$$

6. CONCLUSÃO

A análise da proposta de tratamento de efluentes da indústria avícola demonstrou uma alta eficiência na remoção dos principais poluentes, com reduções significativas nos teores de DBO, DQO, SS e NTK ao longo das etapas do sistema. A aplicação da metodologia de Von Sperling (2005) permitiu uma estimativa confiável da remoção dos contaminantes, indicando que o sistema pode atingir mais de 95% de eficiência na remoção de matéria orgânica e sólidos suspensos.

Ao comparar os valores finais estimados com os limites estabelecidos pela Resolução COEMA 02/2017, observa-se que o sistema proposto pode permitir o enquadramento do efluente tratado dentro dos padrões ambientais exigidos para lançamento em corpos hídricos.

A combinação das tecnologias de tratamento biológico (lodos ativados) e físico-químico (coagulação, floculação e filtração) mostrou-se eficaz para a melhoria da qualidade do efluente final, reduzindo significativamente a carga poluidora antes do descarte. Além disso, a etapa de desinfecção com cloro garante a eliminação de microrganismos patogênicos, atendendo aos requisitos sanitários.

Embora sistemas de tratamento por lagoas de estabilização sejam alternativas mais econômicas para remoção de matéria orgânica, essa opção foi descartada devido à grande demanda de área necessária para sua implementação e aos potenciais problemas de geração de odores, que poderiam impactar o entorno da unidade industrial. Dessa forma, a tecnologia escolhida baseada em lodos ativados convencionais associados a processos físico-químicos e desinfecção foi definida como a alternativa mais adequada, equilibrando eficiência de tratamento, viabilidade técnica e conformidade ambiental.

Portanto, o sistema de tratamento proposto representa uma alternativa tecnicamente viável e eficiente para a gestão de efluentes da indústria avícola, contribuindo para a redução dos impactos ambientais e o cumprimento da legislação vigente. A implementação e monitoramento contínuo desse sistema são essenciais para garantir a sustentabilidade do processo produtivo e a proteção dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). *Water Treatment Plant Design.* 5. ed. Nova York: McGraw-Hill, 2011. Acesso em: 08 fev. 2024.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Relatório de Qualidade da Água no Brasil.** Brasília: ANA, 2023. Acesso em: 28 out. 2024.

AMORIM, AKB & de Nardi, IR & Del Nery, V., 2007. "Conservação de água e minimização de efluentes: Estudo de caso de um matadouro de aves," Recursos, Conservação e Reciclagem, Elsevier, vol. 51(1), páginas 93-100. Acesso em: 28 out. 2024

BAUMANN, E. R. (1971). **Water quality and treatment –a handbook of public water supplies.** 3th ed. AWWA. McGraw –Hill. Acesso em: 16 ago. 2024.

BEUX, S. **Avaliação do tratamento de efluente de abatedouro em digestores anaeróbios de duas fases.** 2005. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos). Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2005. Acesso em: 04 jan. 2025.

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.** Diário Oficial da União, Brasília, 2011. Acesso em: 22 fev. 2025.

CAMPOS, J. R. **Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo.** 2. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2010. Acesso em: 20 maio. 2024.

CARNEIRO, J. O.; SILVA, P. R.; SOUZA, M. A. **Tratamento de efluentes na indústria avícola: desafios e perspectivas.** Revista Brasileira de Engenharia Ambiental, v. 23, n. 4, p. 567-580, 2019. Acesso em: 24 nov. 2024.

CARVALHO, MARIA J. H. **Uso de Coagulantes Naturais no Processo de Obtenção de Água Potável.** 2008. 154f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008. Acesso em: 31 out. 2024.

CAVALCANTI, J. E. W. de A. **Manual de Tratamento de Efluentes Industriais.** 2 ed. São Paulo: Engenho Editora Técnica Ltda, 2012. Acesso em: 18 set. 2024.

CHERNICHARO A. L, et al. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios por sistemas de desinfecção.Pós-tratamento de efluentes anaeróbios.** PROSAB, Rio de Janeiro, 1999. cap.7. Acesso em: 07 jan. 2025.

COSTA, LR; SANTOS, PA; MENDES, FC **Tratamento de efluentes na avicultura: uma revisão.** Revista Brasileira de Engenharia Ambiental, v. 2, pág. 56-67, 2023. Acesso em: 16 abr. 2024.

COTTA, T. **Frangos de corte: criação, abate e comercialização.** Viçosa: Aprenda Fácil, 2003. 237 p. Acesso em: 31 out. 2024.

Del Pozo, R., & Diez, V. (2005). "Integrated anaerobic-aerobic fixed-film reactor for slaughterhouse wastewater treatment." *Water Research*, 39(6), 1114-1122. Acesso em: 05 out. 2024

DI BERNARDO, L. (1993). **Métodos e técnicas de tratamento de água.** ABES, v.1, Rio de Janeiro. Acesso em: 22 dez. 2024.

DI BERNARDO, L; SABOGAL PAZ, L.P. **Seleção de tecnologias de tratamento de água.** 2 ed. São Carlos: ABES, RiMa, 2009. v I. Acesso em: 22 dez. 2024.

ECKENFELDER, W. W.; MUSTERMAN, J. L. **Activated sludge treatment of industrial wastewater.** Technomic Publishing Company. 1995. Acesso em: 22 dez. 2024.

FERNANDES, M.L.; SILVA, TP **Aproveitamento de subprodutos no tratamento de efluentes avícolas.** Revista AgroSustentável, v. 4, pág. 90-102, 2024. Acesso em: 08 ago. 2024.

FILHO, K, Z, GARCIA, L, A, V, Et al. **Reuso da Água.** Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2007. Acesso em: 14 maio 2024.

FORESTI, E.; CAMPOS, R. J.; BERNARDO, L. (1978). **Águas residuárias de abatedouros de aves: origem, caracterização e tratamento**. Universidade de São Paulo –Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, São Paulo. Acesso em: 08 ago. 2024.

FREIRE, R.S.; PELEGRINI, R.; KUBOTA, I.I.; DURÁN, N.; PERALTA – ZAMORA, P. (2000). **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Química Nova, 23, 504. Acesso em: 14 maio 2024.

GHANDI, G. **Tratamento e Controle de Efluentes Industriais** In: 23 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo grande. 2005. P.5-46. Acesso em: 14 mar. 2024.

GOV.BR, **Brasil lidera ranking mundial de exportação de carne de frango**, disponível em www.gov.br/pt-br/noticias/financas-impostos-e-gestao-publica/2022/09/brasil-lidera-ranking-mundial-de-exportacao-de-carne-de-frango. Acesso 10 abril 2024.

INDSUTRIAL hygiene engineering: recognition, measurement, evaluation and control. principles of noniozing radiation. 2. ed. New York, 1995 p. 564-583. Acesso em: 14 maio 2024.

JOHNS, M. R.. **Developments in wastewater treatment in the meat processing industry: a review**. *Bioresouce Technology*, v. 54, p. 203-216, 1995. Acesso 10 abril 2024.

JORDÃO, E.P.; PESSÔA, C.A. **Tratamento de esgotos domésticos**. ABES: Rio de Janeiro, 2017, vol 8, p. 915. Acesso 10 abril 2024.

KÖNING, R. **UV wastewater disinfection: the key to the future**. Water 21, p. 30-32, 2001. Acesso 15 abril 2024.

LEGNER, Carla; Filtro **Prensa no tratamento de água e efluentes**, Revista Meio Filtrante, São Paulo, Edição Nº85, Março/Abril 2017. link=ultima&fase=C&id=1139&retorno=c>. Acesso em: 08 ago. 2024.

LEME, E. J. de A. **Manual Prático de Tratamento de Águas Residuárias**. São Carlos: EDUFSCar, 2010. Acesso 15 abril 2024.

MATOS, A. C.; LIMA, R. P.; FREITAS, D. A. **Caracterização e tratamento de efluentes da indústria avícola.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 120-132, 2018. Acesso 15 abril 2024.

MENEZES, P. H. N. **Estudo do desempenho do sulfato de alumínio no processo de clarificação da água de uma refinaria de petróleo e avaliação do Tanfloc como agente coagulante alternativo.** Mestrado em Engenharia Industrial; Universidade Federal da Bahia, 2019. Acesso 15 abril 2024.

Martins, JP , Silva, RF e Souza, AL (2020). **Tratamento de Efluentes na Indústria Avícola: Desafios e Tecnologias.** Revista Brasileira de Engenharia Ambiental , 15(3), 45-55. Acesso em: 18 set. 2024.

MENDES, JP; ALMEIDA, SR **Impactos ambientais do descarte inadequado de efluentes avícolas.** *Revista de Ciências Ambientais*, v. 3, pág. 78-85, 2020. Acesso em: 18 set. 2024.

METCALF, L; EDDY, H P. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos.** 5. ed. Nova Iorque: Mcgraw-hill, 2016. 2008 p. Tradução de: Ivanildo Hespanhol e José Carlos Mierzwa. Acesso em: 20 set. 2024.

MEYER, S.T. **O Uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública.** Caderno de Saúde Pública, v.10, n.1, p.99-110, 1994. Acesso em: 18 fev. 2024.

MONTEIRO, S. F. **Aspectos do licenciamento ambiental de avicultura no estado do Tocantins.** Monografia, Tocantins, 2009. Acesso em: 16 set. 2024.

NUNES, J. A. **Tratamento físico-químico de águas residuárias industriais.** 6. ed. Aracaju: Gráfica e Editora J. Andrade, 2012, 85 p.

PARASKEVA, P. & GRAHAM, N.J. (2002) **Ozonation of municipal wastewater effluents.** *Water Environment Research*, v. 74, n. 6, p. 569-581. Acesso em: 26 ago. 2024.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada.** Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, Dissertação de Mestrado; São Carlos, 2001. Acesso em: 26 ago. 2024.

PEREIRA, Felix Monteiro. **Filtração.** 2010. Material didático - Escola de Engenharia de Lorena - USP. Disponível em: . Acesso em: 14 ago. 2024.

PERNITSKY, D.; EDZWALD, J. (2003) **Solubility of polyaluminium coagulants.** *Journal of Water Supply: Research and Technology*, v. 52, n. 6, p. 395-406. Acesso em: 26 ago. 2024.

POOLPISCINAS. **Sulfato de Alumínio.** São José dos Campos-SP. Disponível em: < <https://www.poolpiscina.com/sulfato-de-aluminio/#Sulfato-de-Aluminio>> Acesso em: 15 de Agosto 2024.

RESENDE, Mercia Luccas; CARVALHO, Eraldo Henriques de. **Ensaios de coagulação e floculação para utilização na estação de esgotos de Goiânia.** In: XXVIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, México. 2002. Acesso em: 26 jan. 2024.

RIBEIRO, W. C. **Geografia política da água.** 1^a Ed. São Paulo: Annablume, 2008. Acesso em: 26 jan. 2024.

RICE, R.G.; EVISON, L.M.; ROBSON, C.M. (1981) **Ozone disinfection of municipal wastewater-current state-of-the-art.** Ozone Science and Engineering, v. 3, n. 4, p. 239-272. Acesso em: 20 mar. 2024.

RICHTER, Carlos A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento.** São Paulo: Blucher. 2009. Acesso em: 22 mar. 2024.

ROBSON, C.M. & RICE R.G. (1991) **Wastewater ozonation in the USA – history and current status – 1989.** Ozone Science and Engineering, v. 13, n. 1, p. 23-40. Acesso em: 20 mar. 2024.

ROCHA, EV; SOUZA, MT; NASCIMENTO, PA **Polimento de efluentes e reutilização na indústria avícola.** *Revista de Tecnologia Ambiental*, v. 1, pág. 66-77, 2023. Acesso em: 25 mar. 2024.

ROLIM, Sérgio. **Sistemas de Lagunas de Estabilização: Teoria e Aplicação,** 2019. Acesso em: 16 jun. 2024.

SANTOS FILHO, F. (1973). **Tecnologia de tratamento de água para a indústria.** Nobel. São Paulo. Acesso em: 16 jun. 2024.

SANTOS, F. H.; OLIVEIRA, G. R. **Tecnologias para o tratamento de efluentes na avicultura: uma revisão. Revista de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 15, n. 1, p. 89-105, 2021. Acesso em: 10 jun. 2024.

Santos T. R. T.; Valverde K. C.; Nishi L.; Bergamasco R.; Vieira M. F. **Estudo da formação de trihalometanos no processo de coagulação/flocação/adsorção em carvão ativado vegetal com o coagulante natural Moringa oleífera Lam para o tratamento de água de abastecimento.** Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 5, p. 64-72, 2013.

SILVA, JL; MARTINS, FA; RIBEIRO, DS **A importância do tratamento de efluentes na sustentabilidade da avicultura. Revista do Agronegócio Brasileiro**, v. 1, pág. 25-36, 2022.

SILVA, M. F.; PEREIRA, C. A.; RODRIGUES, L. M. **Impactos ambientais dos efluentes da indústria avícola. Revista de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 3, p. 211-226, 2020.

SIVAKUMAR, K.; KUMAR, V. R. S.; JAGATHEESAN, P. N. R.; VISWANATHAN, K.; CHANDRASEKARAN, D. **Seasonal variations in composting process of dead poultry birds. Bioresource Technology**, v. 99, p. 3708 – 3713, 2008. Acesso em: 18 jul. 2024.

TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. Nova York: McGraw-Hill, 2003. Acesso em: 18 jul. 2024.

OLIVEIRA, MR; SANTOS, GB **Efluentes da avicultura: composição e desafios no tratamento. Revista Técnica de Saneamento**, v. 2, pág. 34-44, 2021. Acesso em: 16 jun. 2024.

Von Sperling, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos** / Marcos von Sperling. 4. Ed. – Belo Horizonte: UFMG, 2016. p. 319. Acesso em: 07 mar. 2025.

Von Sperling, Marcos. **Lodos Ativados** / Marcos von Sperling. 4. Ed. – Belo Horizonte: UFMG, 2016. p. 16. Acesso em: 07 mar. 2025.

WAKEMAN, R. J.; TARLETON, E. S. (1999).**Filtration: equipament selection, modeling and process simulation.** Elsevier Science. New York. p. 446.
Acesso em: 07 mar. 2025.

ANEXOS

- I. Fluxograma de processo;
- II. Planta baixa em modelagem bim.