



**UNIVERSIDADE CATÓLICA DO SALVADOR**  
**ESCOLA DE ENGENHARIAS E ARQUITETURA**  
**CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ADELINY NAIRA RIBEIRO SANTOS DA CONCEIÇÃO**  
**GUILHERME JORGE ALMEIDA OLIVEIRA**  
**JULIANA CRUZ FERREIRA**

**DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS E ANÁLISE ECONÔMICA PARA  
UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM UMA PLANTA DE  
ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS PETROQUÍMICOS.**

**SALVADOR**

**2024**

**ADELINY NAIRA RIBEIRO SANTOS DA CONCEIÇÃO**  
**GUILHERME JORGE ALMEIDA OLIVEIRA**  
**JULIANA CRUZ FERREIRA**

**DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS E ANÁLISE ECONÔMICA PARA  
UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES EM UMA PLANTA DE  
ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS PETROQUÍMICOS.**

Monografia apresentada ao curso de  
Engenharia Química da Universidade Católica  
do Salvador, com requisito à obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Química.  
Orientador: Prof<sup>o</sup>. Msc. Lucas Oliveira Cardoso.

SALVADOR  
2024

## Agradecimentos

Primeiramente, agradecemos a Deus, que possibilitou que esta jornada venha se concretizar, não apenas durante os anos de universidade, mas ao longo de toda as nossas vidas. Ele é, sem dúvida, o maior mestre que alguém pode conhecer.

Gostaríamos de expressar nossos mais sinceros agradecimentos ao nosso orientador, Prof. Mestre Lucas Cardoso, pela orientação dedicada, paciência e pelos ensinamentos preciosos ao longo de todo o processo de pesquisa. Suas orientações e percepções foram fundamentais para o sucesso deste estudo. Agradecemos também ao Prof. Mestre Wagner Monaco, pela orientação no desenvolvimento do nosso TCC anterior e pelo apoio contínuo no novo projeto, sempre com esclarecimentos, sugestões valiosas e contribuições que enriqueceram nosso trabalho. E a Eng<sup>a</sup>. Química Vitória Miranda pelo suporte.

Aproveitamos para agradecer a todos os professores que, ao longo da nossa formação, nos transmitiram não apenas conhecimento técnico, mas também nos ensinaram a importância do caráter, da ética e da afetividade no processo educativo. Seu comprometimento com o nosso crescimento profissional e pessoal foi essencial, e somos gratos por terem nos inspirado a aprender e a evoluir, não só na teoria, mas também na prática.

Não podemos deixar de expressar nossa profunda gratidão às nossas famílias, pelo amor incondicional, apoio emocional e compreensão ao longo desta jornada acadêmica. Suas palavras de incentivo e confiança foram nossos pilares.

Por fim, agradecemos a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste estudo, direta ou indiretamente. Este trabalho é fruto de um esforço coletivo e reflete a colaboração e apoio de todos que acreditaram em nós.

## RESUMO

Este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade da implementação de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) própria para uma empresa de armazenamento de produtos químicos, que será referida como empresa A, com a finalidade de eliminar os custos com transporte de efluentes e reduzir as despesas com o tratamento terceirizado. A pesquisa evidencia o tratamento do efluente gerado durante a adequação dos tanques de armazenamento de produtos químicos líquidos, destacando a importância da conformidade com as normas ambientais. Atualmente, a empresa realiza o tratamento de seus efluentes com a CETREL, mas enfrenta elevados custos com o transporte especializado, que superam os gastos com o próprio tratamento. A proposta do estudo inclui o dimensionamento de uma ETE própria, considerando diferentes tecnologias de tratamento de efluentes que atendam às exigências das resoluções do CONAMA. O processo de tratamento proposto abrange a correção de pH, decantação primária retangular (com eficiência de 35% para DBO e 60% para sólidos suspensos), flotação por ar difuso (eficiência de 70% para DBO, 90% para sólidos suspensos e 95% para óleos e graxas), oxidação química (eficiência de 80,6% para DQO) e filtração com areia e carvão ativado (eficiência de 66% para DBO e 72% para sólidos suspensos). A solução proposta demonstrou uma alta eficiência na remoção de poluentes, com reduções de 98,71% na DBO, 98,88% nos sólidos suspensos e 95% nos óleos e graxas. Considerando que o custo atual da empresa A é de R\$ 1.822.678 a análise econômica apontou que o projeto é financeiramente viável, pois com um investimento inicial de R\$ 1.303.077, seu custo anual passa a ser de R\$ 697.393 e payback de cerca de 1 ano e 8 meses. A implementação da ETE oferece uma solução sustentável, com benefícios econômicos e ambientais, podendo servir como modelo para outras empresas do setor.

**Palavras-chave:** Estação de Tratamento de Efluentes, Armazenamento de produtos químicos, sustentabilidade, CONAMA, análise econômica.

## ABSTRACT

This study aims to assess the feasibility of implementing an in-house Effluent Treatment Plant (ETP) for a chemical storage company, which will be referred to as company A, with the aim of eliminating effluent transportation costs and reducing outsourced treatment costs. The research highlights the treatment of effluent generated during the adaptation of liquid chemical storage tanks, highlighting the importance of compliance with environmental standards. The company currently treats its effluent with CETREL, but faces high costs with specialized transport, which exceed the costs of the treatment itself. The study proposal includes the sizing of an in-house WWTP, considering different effluent treatment technologies that meet the requirements of the CONAMA resolutions. The proposed treatment process includes pH correction, rectangular primary decantation (with an efficiency of 35% for BOD and 60% for suspended solids), diffused air flotation (efficiency of 70% for BOD, 90% for suspended solids and 95% for oil and grease), chemical oxidation (efficiency of 80.6% for COD) and sand and activated carbon filtration (efficiency of 66% for BOD and 72% for suspended solids). The proposed solution demonstrated high efficiency in removing pollutants, with reductions of 98.71% in BOD, 98.88% in suspended solids and 95% in oil and grease. Considering that company A's current cost is R\$1,822,678, the economic analysis showed that the project is financially viable, since with an initial investment of R\$1,303,077, its annual cost is R\$697,393 and the payback is around 1 year and 8 months. The implementation of the WWTP offers a sustainable solution, with economic and environmental benefits, and could serve as a model for other companies in the sector.

**Keywords:** Effluent treatment plant, chemical product storage, sustainability, CONAMA, economic analysis.

## **LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS**

ABIQUIM - Associação Brasileira da Indústria Química  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo  
CETREL - Central de Tratamento de Efluentes Líquidos  
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente  
COT - Carbono Orgânico Total  
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio  
DQO - Demanda Química de Oxigênio  
ETE - Estação de Tratamento de Efluente  
FAD - Flotador com ar Difuso  
MS - Materiais Suspensos  
NBR - Normas Brasileiras  
SST - Sólidos Suspensos Totais  
TDH - Tempo de Detenção Hidráulico  
TIR - Taxa Interna de Retorno  
TMA - Taxa Mínima de Atratividade  
VPL - Valor Presente Líquido  
MBR - Membrane Bioreactor

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ESQUEMÁTICO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE EXISTENTE.....	24
FIGURA 2 - DIMENSÕES DA ÁREA EM METROS.....	27
FIGURA 3 - ESQUEMÁTICO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE PREVISTA.....	30
FIGURA 4 - DECANTADOR PRIMÁRIO.....	31
FIGURA 5 - FLOTADOR COM AR DIFUSO.....	37
FIGURA 6 - VASO DE FILTRAÇÃO.....	43
FIGURA 7 - FILTRO A SER UTILIZADO.....	43

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - Análise de DQO (mg/l).....	25
GRÁFICO 2 - Análise de DBO (mg/l).....	25
GRÁFICO 3 - Análise de Óleos e Graxas (mg/l).....	26
GRÁFICO 4 - Análise de pH.....	26
GRÁFICO 5 - Análise de Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).....	26

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS DE CONDIÇÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES.....	15
TABELA 2 - VALOR DE COBRANÇA POR CARGA.....	24
TABELA 3 - CUSTOS COM O TRATAMENTO, TRANSPORTE E TOTAL.....	25
TABELA 4 - DADOS MÉDIOS DAS CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE.....	27
TABELA 5 - COMPARAÇÃO ENTRE EFLUENTE E CONAMA.....	28
TABELA 6 - DADOS DE ENTRADA DO PROCESSO.....	30
TABELA 7 - RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO DECANTADOR PRIMÁRIO RETANGULAR.....	44
TABELA 8 - RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO FLOTADOR COM AR DIFUSO.....	45
TABELA 9 - RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO FILTRO DE AREIA.....	49
TABELA 10 - RESULTADOS DA PESQUISA ORÇAMENTÁRIA.....	51
TABELA 11 - CUSTO VARIÁVEL.....	51
TABELA 12 - CUSTO FIXO .....	52
TABELA 13 - INVESTIMENTO TOTAL.....	52
TABELA 14 - FLUXO DE CAIXA DO PROCESSO.....	55
TABELA 15 - RESULTADOS DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE POLUENTES .....	58

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVO.....	12
2.1 Objetivos específicos.....	12
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	12
3.1 Caracterização do tipo de efluentes - Efluente industrial.....	12
3.2 Resoluções CONAMA.....	12
3.3. Rotas tecnológicas - Tratamento.....	15
3.3.1 Etapas de tratamento.....	16
3.3.1.1 Preliminar.....	16
3.3.1.2 Primário.....	17
3.3.1.3 Secundário.....	18
3.3.1.4 Terciário.....	19
3.4 Avaliação econômica.....	22
3.4.1 Custos operacionais.....	22
3.4.2 Valor presente líquido (VPL).....	22
3.4.3 Taxa interna de retorno (TIR).....	23
4 METODOLOGIA.....	23
4.1 Descrição do processo.....	23
4.1.1 Situação atual.....	23
4.1.2 Características históricas do efluente.....	24
4.1.3 . Avaliação de dados da área.....	28
4.1.4. Situação prevista.....	30
4.2 Dimensionamento.....	33
4.2.1 Preliminar.....	33
4.2.2 Primário.....	36
4.3.3 Terciário.....	39
5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	45
5.1 Dimensionamentos.....	45

5.1.1 Preliminar.....	45
5.1.2 Primário.....	46
5.1.3 Terciário.....	48
5.2 Análise Econômica.....	51
6. CONCLUSÃO.....	58
7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	59
REFERÊNCIAS.....	60
APÊNDICE.....	66
ANEXOS.....	69

## 1 INTRODUÇÃO

A logística e o armazenamento de produtos químicos exigem o cumprimento rigoroso de normas de segurança e sustentabilidade. Empresas especializadas nesse segmento, como a Empresa A, investem em infraestruturas e processos que garantem a integridade dos produtos e a proteção do meio ambiente. A adequação de tanques para o armazenamento de diferentes categorias de produtos químicos líquidos é um processo fundamental para a planta e tem como consequência a geração de efluentes industriais.

De acordo com a norma brasileira ABNT NBR 9800/1987, os resíduos ou efluentes industriais incluem descargas oriundas de diversos processos, englobando não apenas aqueles resultantes das atividades produtivas, mas também as águas geradas durante operações de limpeza e outras fontes que comprovadamente contenham contaminantes provenientes dos produtos utilizados ou gerados na indústria.

Em 2001, a ABIQUIM criou o Sistema de Avaliação de Segurança, Saúde, Meio Ambiente e Qualidade (SASSMAQ) para reduzir os riscos de acidentes durante a descontaminação de tanques no Brasil. Em 2007, foi lançado o Módulo Estação de Limpeza, que garante altos padrões nas operações de limpeza e descontaminação (Abiquim, 2021). Os padrões da ABIQUIM e do INMETRO exigem que os auditores verifiquem os procedimentos de limpeza por meio de relatórios de conformidade elaborados por cada empresa. Além disso, é crucial que as empresas realizem o tratamento adequado dos resíduos gerados na limpeza dos equipamentos (Lee, 2021).

No procedimento operacional de uma planta de armazenagem de produtos químicos (Empresa A), o efluente industrial proveniente da adequação dos tanques é direcionado para uma bacia coletora, onde ocorre a neutralização do pH. Após esse processo, o efluente é transportado para a CETREL por meio de um caminhão fretado pela empresa DMCA, especializada no transporte de resíduos, e reconhecida pela sua expertise na gestão logística de materiais industriais de maneira segura e eficiente. Ao chegar ao destino, o efluente é tratado em conformidade com os parâmetros estabelecidos pelas normas para Matéria em Suspensão (MS), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e óleos e graxas, de acordo com a legislação ambiental CONAMA 357 e 430 (CETREL, 2024), antes de ser descartado no oceano.

Atualmente, os custos com o transporte de efluentes industriais da empresa A ultrapassam os gastos com o tratamento realizado pela CETREL. Diante disso, este estudo tem como finalidade avaliar estratégias para melhorar a rentabilidade da empresa no âmbito do tratamento de efluentes, priorizando a escolha da rota tecnológica, o dimensionamento dos equipamentos e a realização de uma análise econômica para viabilizar a implantação de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) própria. Essa solução, além de garantir a conformidade com a Resolução do CONAMA e eliminar os custos de transporte, busca aumentar a eficiência econômica e promover a sustentabilidade ambiental.

A implantação de uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) representa um avanço substancial na redução dos custos com o tratamento de efluentes e na economia operacional a longo prazo. Isso acontece porque a empresa passa a gerenciar internamente o processo, controlando a dependência de fornecedores externos e garantindo maior eficiência no uso de recursos. Embora o investimento inicial seja significativo, ele pode gerar benefícios econômicos ao longo do tempo, como a otimização de processos e o cumprimento mais eficiente das normas ambientais. Além disso, a pesquisa pode servir como um referencial para outras empresas do setor que enfrentam desafios semelhantes.

## **2 OBJETIVO**

Desenvolver uma proposta de melhoria no processo de tratamento de efluentes para reduzir custos operacionais, atender às exigências legais e contribuir para a sustentabilidade ambiental da empresa.

### **2.1 Objetivos específicos**

- Reduzir os custos operacionais associados ao tratamento de efluentes por meio da otimização dos processos e do uso de tecnologias mais eficientes;
- Dimensionar uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) para atender às demandas específicas da empresa, garantindo eficiência operacional e minimização de desperdícios;
- Adequar o efluente tratado às resoluções do CONAMA nº 430/2011 e nº 357/2005, assegurando conformidade ambiental e regulatória;
- Realizar uma análise econômica detalhada para avaliar a viabilidade financeira e o impacto da implementação das melhorias propostas.

## **3 REVISÃO DA LITERATURA**

### **3.1 Caracterização do tipo de efluentes - Efluente industrial**

Efluente industrial é o líquido gerado e descartado em diferentes fases de um processo produtivo, englobando toda a água utilizada por uma indústria (Lemos, 2017). De acordo com a norma brasileira ABNT – NBR 9800/1987, esses efluentes são caracterizados como despejos líquidos provenientes das áreas de processamento industrial, incluindo aqueles gerados nos processos produtivos, águas de lavagem e outras fontes que demonstram poluição por produtos utilizados ou fabricados no estabelecimento.

A conservação do meio ambiente é a principal motivação para o tratamento adequado de efluentes. O descarte inadequado pode poluir rios, lagos e lençóis freáticos, prejudicando a fauna e a flora aquáticas, além de comprometer a qualidade da água destinada ao consumo humano.

### **3.2 Resoluções CONAMA**

O Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) é responsável por estabelecer normas e diretrizes para a proteção do meio ambiente, incluindo o controle e a gestão de

resíduos e substâncias químicas. Ao seguir as resoluções deste conselho, assegura-se que as práticas de armazenamento de produtos químicos sejam realizadas de forma segura e ambientalmente responsável, contribuindo para a preservação do meio ambiente e a segurança da população (Conama, 2018).

A Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, publicada no Diário Oficial da União –18/03/2005.

“Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências” (Conama nº 357/2005).

Esta normativa está centrada na regulação da qualidade dos efluentes líquidos provenientes de atividades industriais, comerciais e de tratamento de águas residuais, assim, esta resolução determina os limites permitidos de concentração de contaminantes nos efluentes que podem ser descartados em corpos de água. Esses limites dependem da classe do corpo receptor de água e do tipo de atividade geradora de efluentes. Exigindo também que os efluentes sejam tratados antes de sua descarga. Os sistemas de tratamento devem ser projetados para cumprir os padrões de qualidade estabelecidos para a classe do corpo de água.

A resolução estabelece critérios específicos para o lançamento de efluentes no mar com limites definidos para a concentração de substâncias e parâmetros de qualidade, que são mais flexíveis em comparação aos aplicados às águas doces. Essa flexibilidade se deve à maior capacidade de diluição dos corpos d'água marinhos e às suas características únicas na assimilação de poluentes.

De acordo com o CONAMA 357 na seção 2, as águas salinas são classificadas em diferentes categorias, cada uma com suas finalidades específicas. Na classe especial, essas águas são destinadas à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral, além de garantir o equilíbrio natural das comunidades aquáticas. A classe 1 abrange águas que podem ser utilizadas para a recreação de contato primário, a proteção das comunidades aquáticas, bem como para a aquicultura e a pesca. A classe 2 é destinada à pesca amadora e à recreação de contato secundário. Por fim, a classe 3 se destina à navegação e à harmonia paisagística.

A resolução que estabelece as condições e padrões para o lançamento de efluentes, conforme o Art. 24 do CONAMA 357, foi revogada em parte pela Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011.

A Resolução nº 430 do CONAMA é uma importante norma ambiental no Brasil que estabelece padrões e critérios para a gestão de águas residuais. Adotada em 13 de maio de 2011, essa resolução visa promover a conservação e a restauração da qualidade dos corpos hídricos, fundamentais para a manutenção da vida e do equilíbrio ambiental.

Um dos principais pontos abordados pela Resolução CONAMA nº 430 é o controle da poluição hídrica, por meio do estabelecimento de normas para o lançamento de efluentes em corpos hídricos. A resolução define limites máximos de concentração admissíveis para contaminantes, como matéria orgânica, sólidos suspensos e metais pesados, garantindo, assim, a proteção da qualidade da água e a conservação do ecossistema subaquático.

Além disso, a resolução orienta sobre o licenciamento ambiental para atividades que possam impactar os recursos hídricos, como indústrias, operações de agronegócio, estações de tratamento de efluentes e outras. Isso significa que qualquer negócio ou atividade relacionada ao uso, apropriação ou alteração de recursos hídricos deve obedecer aos critérios estabelecidos pela legislação ambiental, a fim de alcançar a sustentabilidade e minimizar o impacto ao meio ambiente.

Esta resolução ainda abrange a obrigatoriedade do tratamento prévio dos efluentes antes de serem lançados nos mananciais receptores, informando as obrigações e procedimentos apropriados aos órgãos ambientais competentes, como no Artigo 16 desta mesma resolução, que enumera as condições e padrões de lançamento de efluentes:

“Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente no corpo receptor, desde que obedeçam às condições e padrões previstos neste artigo, resguardadas outras exigências cabíveis:

I – condições de lançamento de efluentes (CONAMA nº430, Artigo 16)”.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros informados na Resolução CONAMA citada.

Tabela 1- Parâmetros de condições de lançamento de efluentes

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor Máximo Permitido</b>	<b>Unidades</b>
DBO - 5 dias a 20°C	remoção mínima de 60%	—
Óleos e graxas	100	mg/L
pH	$5,0 \leq \text{pH} \leq 9,0$	—
Materiais Suspensos	remoção de 20%	—

Fonte: Conama, 2011.

Os efluentes industriais apresentam uma composição físico-química e biológica complexa e variável, de acordo com a matéria-prima usada pela indústria. Por isso, a caracterização representativa do efluente é essencial para a identificação e quantificação dos contaminantes que serão alvos de tratamento.

### 3.3. Rotas tecnológicas - Tratamento

A escolha do tratamento de efluentes está ligada às exigências mínimas estabelecidas pela legislação vigente para a qualidade da água nos corpos receptores, levando em conta sua utilização. Tradicionalmente, os métodos aplicados nas Estações de Tratamento de Efluentes envolvem tratamentos físico-químicos e biológicos, seguindo normalmente as etapas básicas de tratamento preliminar, primário, secundário e terciário (Aljuboury *et al.*, 2017)

As características físicas, químicas e biológicas de despejos líquidos são importantes para avaliar sua composição e o impacto ambiental. Entre as características físicas, destaca-se o conteúdo de sólidos totais, definido como a matéria que permanece como resíduo após a evaporação a temperaturas entre 103° e 105°C. Materiais com significativa pressão de vapor nessa faixa de temperatura são perdidos durante a evaporação, não sendo considerados sólidos. Os sólidos totais podem ser classificados em sólidos em suspensão ou sólidos filtráveis, conforme descrito por Braile e Cavalcanti (1993). Outra característica física relevante é a presença de óleos e graxas, compostos orgânicos provenientes de fontes minerais, vegetais ou animais, incluindo hidrocarbonetos, gorduras e ésteres. Esses compostos podem aumentar as demandas bioquímicas e químicas de oxigênio (DBO e DQO), causando

impacto negativo ao ambiente ao afetar a qualidade visual da água e dificultar a transferência de oxigênio da atmosfera para a água, como apontado por Metcalf e Eddy (2016).

No que se refere às características químicas, destaca-se a Demanda Química de Oxigênio (DQO), utilizada para medir o conteúdo de matéria orgânica em águas residuárias e naturais. Esse teste determina o equivalente de oxigênio necessário para oxidar quimicamente o material orgânico presente no efluente, como no caso do uso de dicromato em solução ácida, segundo Aquino (2006). Outro parâmetro essencial é o pH, que indica desequilíbrios químicos na água, afetando a solubilidade de nutrientes e a precipitação de elementos químicos tóxicos, dependendo de valores específicos de pH, segundo Padilha (2021).

Por fim, as características biológicas incluem a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), considerada o principal parâmetro para medir a poluição orgânica em águas residuárias. A DBO<sub>5</sub>, que avalia a demanda de oxigênio em cinco dias, mede o oxigênio dissolvido consumido por microrganismos na oxidação bioquímica da matéria orgânica. Este parâmetro é amplamente utilizado para estimar a quantidade de oxigênio necessária para a oxidação biológica da matéria orgânica, conforme descrito por Braile e Cavalcanti (1993).

### 3.3.1 Etapas de tratamento

#### 3.3.1.1 Preliminar

O tratamento preliminar é a fase inicial em que se realiza a separação de sólidos volumosos como trapos, galhos, materiais flutuantes, areia e graxa, que podem ocasionar problemas operacionais ou de manutenção nas atividades, processos de tratamento e sistemas auxiliares (Metcalf e Eddy, 2016), é nessa etapa também que ocorre a desarenação, ou sedimentação, que é a responsável pela remoção da areia (Von Sperling, 2005).

Entre os tratamentos preliminares estão: Gradeamento, peneiras, desarenação, neutralização, tanque retentor de óleo ou caixa separadora de óleo, pré-filtração e decantador primário (Jordão; Pessoa, 1995).

De acordo com Braile e Cavalcanti, a neutralização de despejos industriais pode ser necessária não apenas para evitar o lançamento de água ácida ou alcalina no corpo d'água receptor, mas também como medida essencial para a proteção de tratamentos de jusante, como a depuração por métodos biológicos; para efluentes ácidos, podem ser utilizados lama de cal, calcário, carbonato de sódio, soda cáustica, amônia e despejo alcalino, enquanto para

efluentes alcalinos são indicados ácido sulfúrico, ácido clorídrico, dióxido de carbono, gás de água, enxofre e despejo ácido.

O decantador primário retangular pode ser considerado superior ao circular em determinadas situações, dependendo das características do efluente e das necessidades do tratamento. Segundo Metcalf & Eddy (2016), o formato retangular proporciona um melhor controle do fluxo, reduzindo a turbulência em comparação com os decantadores circulares, que podem apresentar variações mais significativas no fluxo. Além disso, Henze et al. (2002) destacam que o design retangular é mais adaptável a locais com espaço limitado, permitindo um melhor aproveitamento do terreno.

Após essa etapa o efluente, devidamente homogeneizado, é encaminhado para o tratamento primário.

### 3.3.1.2 Primário

O processo do tratamento primário consiste na remoção de parte de sólidos suspensos e matéria orgânica do esgoto, ou seja, ocorre por etapas de separação físico-químicas, visando equalizar e neutralizar os resíduos através de adição de produtos químicos (Metcalf e Eddy, 2016).

Entre os tratamentos primários estão: Sedimentação, Flotação, Filtração, Coagulação e Floculação, Desidratação de Lodo, flotador com ar difuso e Oxidação (Jordão; Pessoa, 1995).

De acordo com Santos (2018), a flotação é um método amplamente utilizado para a remoção de óleos, graxas e detergentes, sendo particularmente relevante em setores como petroquímicas, lavanderias e termelétricas, onde há a mistura de óleo e água. Os flotadores utilizados no tratamento de efluentes incluem os flotadores por ar dissolvido (FAD), que introduzem ar sob pressão para formar bolhas que elevam sólidos e óleos à superfície, e os flotadores por ar não dissolvido, que usam bolhas que se aderem a partículas. Os flotadores de jato misturam rapidamente o efluente com ar, enquanto os flotadores de superfície operam na camada superior do líquido e os flotadores de camada formam uma superfície de flocos removíveis. A escolha do tipo depende das características do efluente e das necessidades do tratamento.

Nos sistemas de flotação por ar dissolvido (FAD), o ar é comprimido no efluente sob alta pressão, normalmente várias atmosferas, e, em seguida, essa pressão é aliviada até atingir a pressão atmosférica. Em sistemas menores, uma bomba pressurizada toda a vazão a uma

pressão de 275 a 350 kPa (40 a 50 lbf/in<sup>2</sup>), com ar comprimido sendo introduzida na atração de sucção da bomba. O efluente permanece sob pressão em um tanque de retenção por alguns minutos para permitir que o ar se dissolva especificamente. Depois, a mistura é direcionada para o tanque de flotação através de uma válvula redutora de pressão, onde o ar se libera formando bolhas muito pequenas (Metcalf e Eddy, 2016).

Os objetivos de tratamento, como a remoção de sólidos ou a melhoria da qualidade da água para reutilização, também são considerados. Além disso, a configuração do sistema e o espaço disponível influenciam a decisão, já que esses floccados se adaptam a diferentes plantas de tratamento (Silvestre, 2019).

O flotor por ar difuso é frequentemente utilizado devido a várias características do efluente e necessidades do tratamento. Ele é especialmente eficaz em efluentes com alta carga de sólidos, onde as pequenas bolhas de ar melhoram a remoção de partículas. É ideal para efluentes que contêm óleos e graxas, pois promove a flutuação desses contaminantes. Além disso, sua eficiência em diferentes condições químicas (pH e temperatura) e a capacidade de atender a objetivos específicos de tratamento, como a reutilização da água, o tornam uma escolha versátil. A adaptação ao espaço disponível nas plantas de tratamento também contribui para sua popularidade (Silvestre, 2019).

### 3.3.1.3 Secundário

Segundo Von Sperling (2005), o principal objetivo do tratamento secundário é a remoção da matéria orgânica, que se apresenta de duas formas, a matéria orgânica dissolvida, que não é eliminada por métodos físicos simples, como a sedimentação utilizada no tratamento primário e a matéria orgânica em suspensão, que é em grande parte removida no tratamento primário, mas cujos sólidos de decantação mais lenta continuam presentes na fase líquida.

Entre os tratamentos secundários estão: Lodos ativados, Reatores Anaeróbios, Reatores aeróbicos, Lagoas de Estabilização, Reatores Biológicos de Leito Fixo, Processos de Biofiltração (Jordão; Pessoa, 1995).

De acordo com Gaspar (2004), o UASB é eficaz na remoção de DQO em efluentes com cargas moderadas a altas de matéria orgânica, mas sua eficiência diminui significativamente quando as concentrações de DQO são extremamente altas. Em efluentes com DQO muito elevado (tipicamente > 4.000-5.000 mg/L), o reator pode não conseguir

tratar eficazmente o efluente, resultando em baixa eficiência de remoção. Já que em cargas orgânicas altas, o reator pode enfrentar dificuldades em manter uma boa taxa de sedimentação do lodo e pode haver acúmulo excessivo de sólidos, afetando a operação do sistema.

Segundo Stephenson (2000), cargas elevadas de DQO podem levar a um acúmulo excessivo de sólidos e compostos orgânicos nas membranas, resultando em fouling (obstrução) e reduzindo a eficiência do sistema. Isso exige limpeza frequente das membranas e pode diminuir a vida útil dos equipamentos.

Conforme Henze et al. (2002), a salinidade elevada pode afetar a osmose reversa e outros processos de separação, resultando em menor eficiência na filtração. Além de que, a alta concentração de sais dissolvidos na água, pode impactar negativamente a microbiota necessária para a biodegradação, reduzindo a eficiência do tratamento. Embora uma alta relação DQO/DBO possa indicar baixa biodegradabilidade, como mencionado por Silva (2012), a presença de compostos tóxicos ou inibidores pode interferir na atividade microbológica, resultando em um tratamento menos eficaz. Dessa forma os custos operacionais em sistemas de biorreator com membranas (MBR) podem aumentar significativamente devido à necessidade de manutenção frequente das membranas e limpeza decorrente do fouling.

#### 3.3.1.4 Terciário

O tratamento terciário é elaborado para maximizar a eficiência na remoção de nutrientes, fazendo assim a remoção de sólidos suspensos residuais, após tratamento secundário, usualmente por filtros granulares, filtros de pano ou micro telas. A desinfecção é, também, um componente típico do tratamento terciário (Metcalf e Eddy, 2016).

Entre os tratamentos terciários estão: Filtração avançada, Oxidação avançada, desinfecção, adsorção, remoção de nutrientes e Tratamento de Efluentes por Eletroquímica (Jordão; Pessoa, 1995).

Para Sperling (2005) a oxidação química é uma abordagem eficaz para tratar efluentes com alta carga de DQO (até 50 mil) e elevada salinidade, além de uma relação alta de biodegradabilidade (DQO/DBO). Essa técnica degrada compostos orgânicos complexos, mantendo sua eficácia em condições adversas onde os processos biológicos podem falhar. A ação rápida da oxidação química é benéfica para lidar com altas concentrações de poluentes, além de reduzir a toxicidade, transformando compostos nocivos em subprodutos menos

prejudiciais. Sua flexibilidade permite ajustes conforme as características do efluente, tornando-a uma escolha viável para esses casos.

Em concordância com Dallamuta (2019), em um estudo sobre a eficiência dos POAs na redução da demanda química de oxigênio (DQO) em efluentes líquidos, destacou-se que a adição de apenas peróxido de hidrogênio no pH de 3,8 é o método mais eficiente para a redução de DQO. Além do custo ser menor, já que é um só reagente.

Utilizar a oxidação química com peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) apresenta várias vantagens em relação a outros agentes oxidantes, o  $H_2O_2$  é altamente eficaz na degradação de uma ampla gama de contaminantes orgânicos (Santos, 2008) e possui baixa toxicidade, pois se decompõe em água e oxigênio, minimizando impactos ambientais. Além disso, pode ser utilizado em diferentes concentrações e combinado com catalisadores para aumentar sua eficácia (García *et al.*, 2020). Sua ação rápida é benéfica para tratamentos imediatos de efluentes (Zhang *et al.*, 2017) e é compatível com outros processos de tratamento, melhorando a eficiência geral (Cohen *et al.*, 2016).

De acordo com Araújo (2009) os Processos Oxidativos Avançados (POAs) são eficazes na degradação de compostos orgânicos, utilizando o radical hidroxila ( $HO\cdot$ ) para convertê-los em substâncias mais simples e menos tóxicas. Contudo, é fundamental monitorar a formação de poluentes orgânicos persistentes (POPs), pois alguns subprodutos podem ser mais tóxicos e menos biodegradáveis que os compostos originais. Entre as diversas técnicas investigadas para eliminar esses poluentes, como fotólise, fotocatalise, ozonólise, oxidação Fenton e biodegradação.

Segundo Mattos (2003), o peróxido de hidrogênio é um dos oxidantes mais versáteis disponíveis, sendo superior ao cloro, dióxido de cloro e permanganato de potássio. Quando catalisado, o  $H_2O_2$  pode ser convertido no radical hidroxila ( $\cdot OH$ ), cuja reatividade é inferior apenas à do flúor. Ao listar os oxidantes mais potentes e seus potenciais padrão (em V), tem-se a seguinte ordem: flúor (3,0), radical hidroxila (2,8), ozônio (2,1), peróxido de hidrogênio (1,77), permanganato de potássio (1,7), dióxido de cloro (1,5) e cloro (1,4).

O processo Fenton, conforme descrito por Adário (2014), se destaca no tratamento de efluentes industriais com altas cargas de DQO e toxicidade, como os efluentes das cabines de pintura, sendo baseado na formação do hidroxila radical a partir da precipitação do peróxido de hidrogênio, catalisada por íons ferrosos. Embora seja uma técnica eficiente, sua aplicação em efluentes provenientes de produtos químicos armazenados em locais específicos ainda é

pouco documentada. A eficácia do tratamento Fenton foi comprovada em diversos estudos, como os de Coelho et al. (2005), que alcançaram 88% de remoção de DQO em águas ácidas de refinarias de petróleo utilizando o Fenton Homogêneo; Souza (2005), que obteve 95% de remoção de COT em efluentes da indústria de Beneficiamento de Castanha de Caju com o mesmo processo; Lange et al. (2006), que atingiram 75% de remoção de DQO em lixiviado de aterro sanitário; Vila et al. (2007), que obteve resultados significativos em efluentes da indústria de laticínios; Queiroz e cols. (2011), com 80,6% de remoção de DQO em efluentes da indústria têxtil; e Santos et al. (2010), que alcançaram 69,9% de remoção de COT utilizando o processo Foto-Fenton em efluentes de lavanderia. Por fim, Adário (2014) aplicou com sucesso o Fenton Homogêneo no tratamento de efluentes gerados em cabines de pintura da indústria moveleira.

O processo de filtração consiste em remover as partículas suspensas e coloidais, além de microorganismos presentes na água que escoam através de um meio filtrante composto por materiais granulares com granulometria apropriada (Di Bernardo, 2005)

### 3.4 Avaliação econômica

A análise econômica constitui-se em um dos pilares do projeto de um processo. Sua função é obter uma estimativa dos custos dos equipamentos do processo previamente desenvolvido, bem como os gastos com matéria-prima, insumos, utilidades, mão-de-obra, capital de giro, etc, compreendendo desde as instalações até a produção (Towler; Sinnott, 2013).

#### 3.4.1 Custos operacionais

O investimento fixo de um projeto é classicamente dividido em ISBL (Inside Battery Limits) e OSBL (Outside Battery Limits), que compreendem investimentos dentro e fora da área de produção, respectivamente. O ISBL compreende os custos de todos os equipamentos que compõem a planta de produção do produto de interesse, como separadores, reatores, bombas, compressores, tanques, etc., bem como os custos com instalação e operacionalização dos mesmos. O OSBL (Outside Battery Limits) abrange os custos relacionados às atividades que estão fora do núcleo de produção da planta (Smith, 2005).

A análise de custos operacionais deste projeto manterá o investimento no tratamento do efluente captado pelas bacias, bem como, nas tecnologias utilizadas para assegurar a correção dos parâmetros indicados, por meio dos equipamentos utilizados.

#### 3.4.2 Valor presente líquido (VPL)

O método do valor presente líquido (VPL) é uma técnica financeira que consiste em trazer todos os fluxos de caixa do investimento para a data zero. Esse processo utiliza a taxa de desconto, também conhecida como taxa mínima de atratividade (TMA), do projeto para descontar os fluxos de caixa futuros. Após este procedimento, os valores descontados são somados ao valor do investimento inicial (Mustafa, 2015).

Conforme Lemes Júnior (2002) o seu valor é determinado subtraindo se do valor inicial de um projeto, o valor presente das entradas líquidas de caixa, descontadas a uma taxa igual ao custo do capital da empresa. Utilizar o VPL para a tomada de decisões facilita o alcance do principal objetivo do administrador financeiro, que é de maximizar a riqueza do acionista ou proprietário.

Em termos mais específicos, o VPL é obtido pela diferença entre o valor presente dos benefícios de caixa previstos e o valor presente do fluxo de caixa inicial, que pode ser o valor do investimento, do empréstimo ou do financiamento.

### 3.4.3 Taxa interna de retorno (TIR)

Segundo Mustafa (2015), é um indicador financeiro que representa a taxa de juros que iguala, em uma única data, os fluxos de entrada e saída de caixa produzidos por uma operação financeira. Ou seja, é a taxa de juros que, se utilizada para descontar um fluxo de caixa, resulta em um valor nulo.

Como a TIR é a taxa de juros que iguala, em determinado momento de tempo, o valor presente das entradas (recebimentos) com o das saídas (pagamentos) previstos de caixa, isso significa que TIR zera o Valor Presente Líquido (VPL) dos fluxos de caixa de um projeto (Mustafa, 2015).

## 4 METODOLOGIA

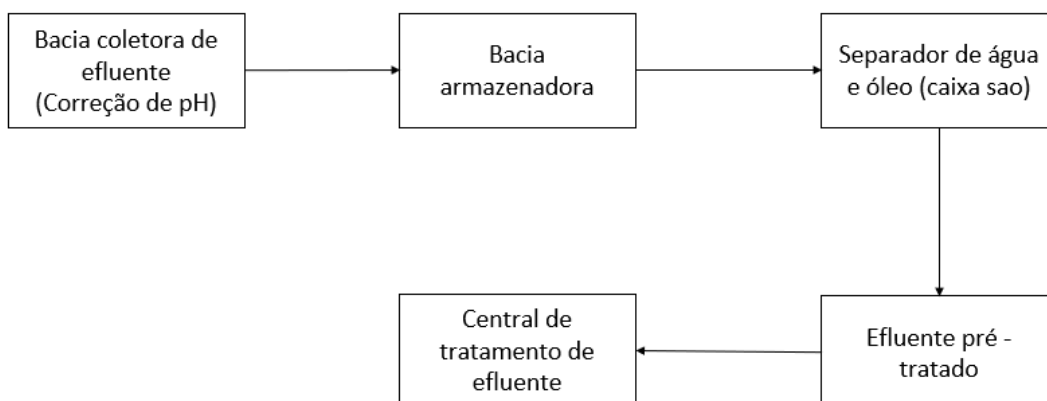
### 4.1 Descrição do processo

#### 4.1.1 Situação atual

Para garantir que o tanque esteja em condições adequadas para uso, é essencial passar por um processo de descontaminação, limpeza e condicionamento. Durante a lavagem dos tanques e das linhas, os efluentes gerados são coletados por um caminhão a vácuo ou por uma bomba pneumática conectada diretamente à linha de esgotamento, sendo posteriormente direcionados ao sistema de efluentes.

Os resíduos são encaminhados para uma bacia coletora, onde são realizadas medições de vazão, volume e pH. Se o pH estiver entre 6 e 9, o efluente pode ser transferido para a bacia armazenadora ou tanque de efluentes. No entanto, se o pH estiver abaixo de 6, é necessário adicionar soda cáustica e realizar a circulação até que o pH atinja a faixa ideal. Para efluentes com pH superior a 9, deve-se corrigir a acidez utilizando uma solução de ácido sulfúrico. Na bacia coletora, existe uma caixa separadora de água e óleo, que diminui a velocidade do efluente oleoso, permitindo que a gravidade faça a separação natural do óleo da água. O efluente que passa por esse pré-tratamento é então enviado.

Figura 1- Esquemático da Estação de Tratamento de Efluente Existente



Fonte: Autoria própria, 2024.

#### 4.1.2 Características históricas do efluente.

Esse tratamento que atualmente é realizado por contrato com a CETREL está de acordo com múltiplo/unidade de resíduo especificada para cada propriedade físico-química inerente a carga do resíduo gerado.

- Os dados de DBO foram corrigidos com a multiplicação da taxa de DQO com o fator de correlação no contrato (0,31250);

Para cada parâmetro é cobrado um valor, que é ajustado a cada ano. conforme descrito na tabela 2 a seguir:

Tabela 2 - Valor de cobrança por carga.

<b>volume (m<sup>3</sup>)</b>	<b>DBO (kg)</b>	<b>Materiais Suspensos (kg)</b>	<b>Óleos e graxas(kg)</b>
R\$ 2,08	R\$ 4,41	R\$ 8,11	R\$ 15,00

Fonte: Autoria própria, 2024.

E para cada data de análise foi enviada à carreta com o frete de R\$2.460 por viagem realizada com capacidade máxima até 30.000 litros. Resultando assim no valor total de tratamento e transporte informado na tabela detalhada no anexo.

Tabela 3- Custos com o tratamento, transporte e total

	<b>CETREL</b>	<b>DMCA</b>	<b>Total</b>
<b>Valores por ano (R\$)</b>	649.896	1.172.792	1.822.688

Fonte: Autoria própria, 2024

Conforme os gráficos abaixo, foram analisados pela CETREL os parâmetros de condutividade, DQO, óleos e graxas, sólidos suspensos e pH no período de junho de 2023 a julho de 2024.

Gráfico 1 - Análise de DQO (mg/l).

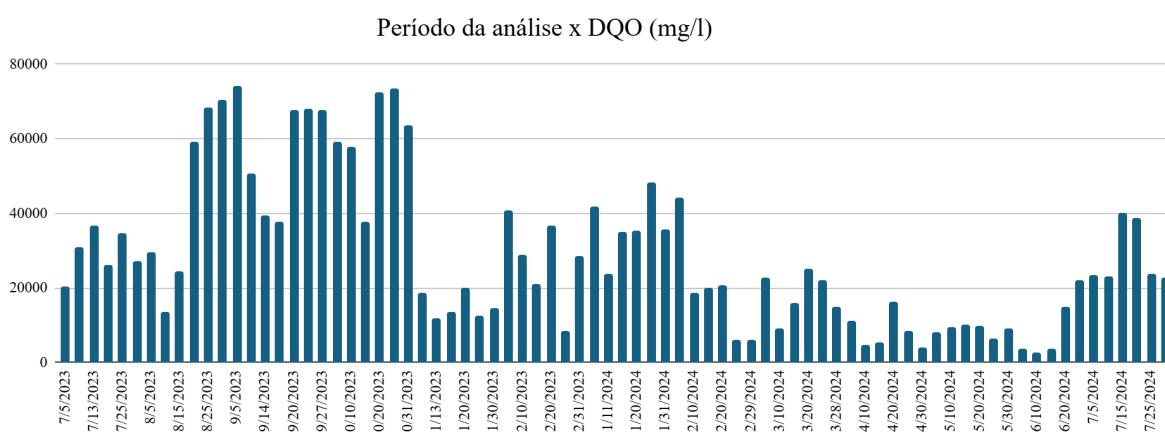


Gráfico 2 - Análise de DBO (mg/l).

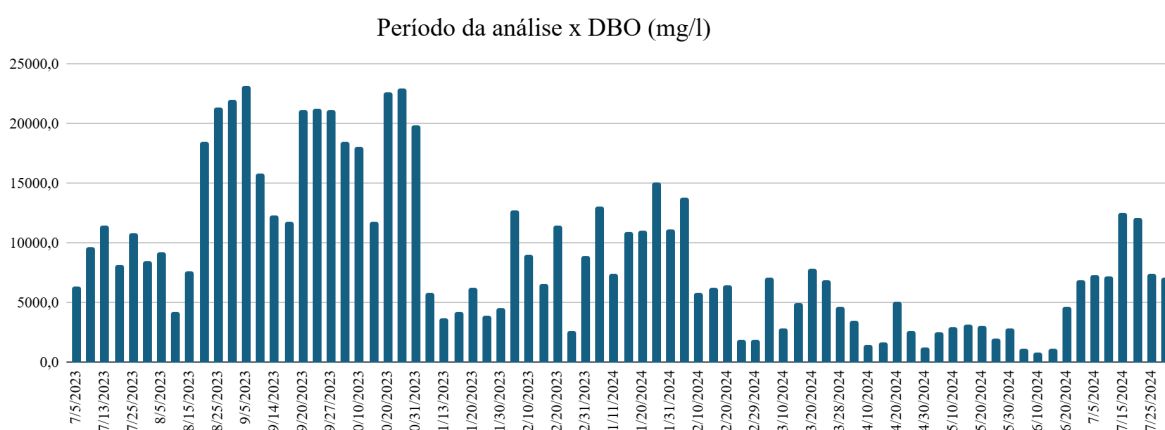


Gráfico 3 - Análise de Óleos e Graxas (mg/l).

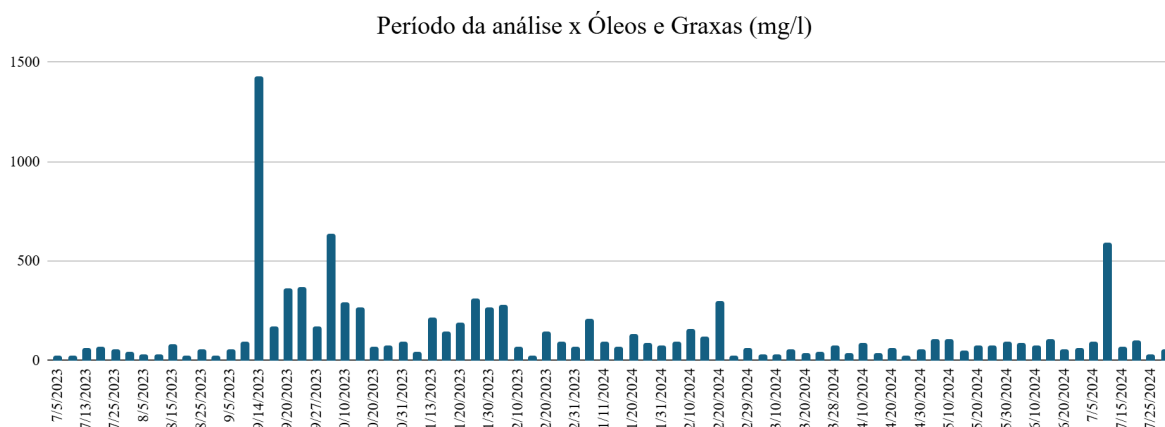
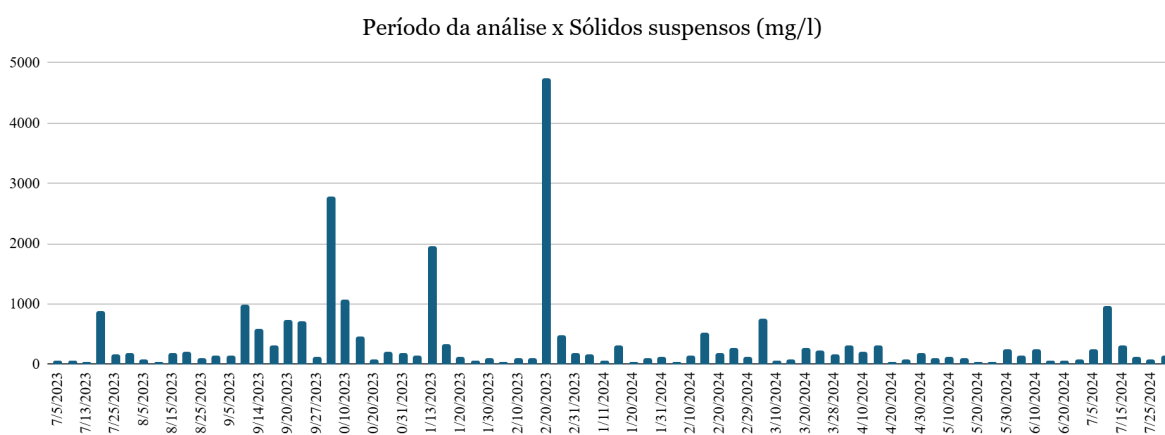
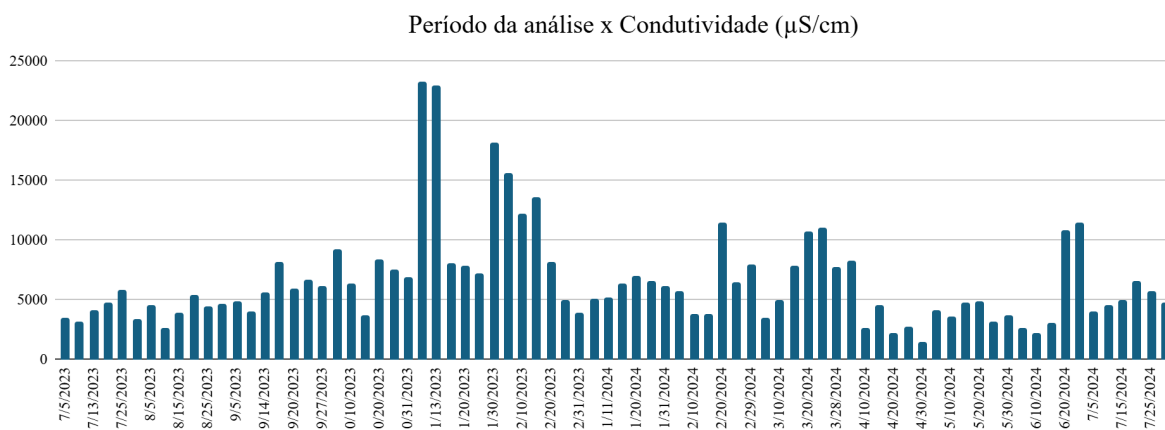


Gráfico 4 - Análise de pH.

Gráfico 5 - Análise de Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

Diante o exposto pelos gráficos seguem abaixo a média de vazão e parâmetros.

Tabela 4 - Dados médios das características do efluente.

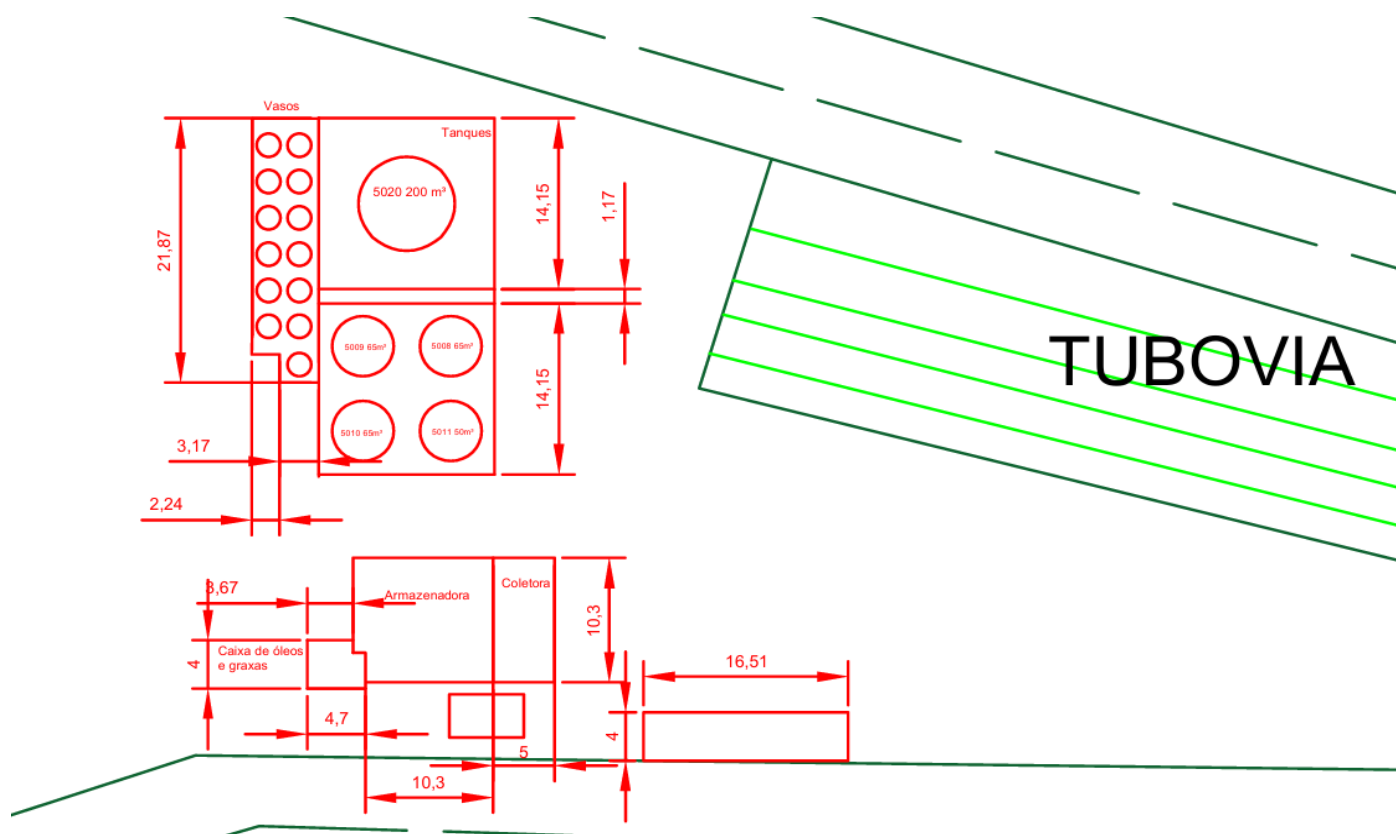
	<b>DQO (mg/L)</b>	<b>DBO (mg/L)</b>	<b>Óleos e Graxas (mg/L)</b>	<b>pH</b>	<b>Materiais Suspensos (mg/L)</b>	<b>Condutivi dade</b>
Jul/23 a Jul/24	28.637	8.949	132	7	343	6.512

Fonte: Aatoria própria, 2024.

#### 4.1.3 . Avaliação de dados da área.

Na Figura 2, é possível visualizar as dimensões da área em metros, bem como a capacidade de armazenamento em metros cúbicos das diferentes estruturas de armazenamento. A bacia armazenadora possui uma capacidade de 400 m<sup>3</sup>, a bacia coletora tem 100 m<sup>3</sup>, o tanque 5020 armazena 200 m<sup>3</sup>, o tanque 5011 tem 50 m<sup>3</sup>, o tanque 5010 e o tanque 5009 possuem ambos 65 m<sup>3</sup>, e o tanque 5008 tem uma capacidade de 50 m<sup>3</sup>.

Figura 2 - Dimensões da área em metros



Fonte: Aatoria própria, 2024.

#### 4.1.4. Situação prevista

Após a identificação dos parâmetros físico-químicos atribuídos ao resíduo gerado no sistema de tratamento, oriundos da limpeza dos tanques da unidade em estudo, percebeu-se por meio de análises físico-químicas a presença de contaminantes nocivos ao meio ambiente. Com base na Resolução n.º 430, artigo 16, de 11 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, foi realizada uma comparação aos parâmetros da unidade, como mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparação entre Efluente e CONAMA

Período	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	Óleos e Graxas (mg/L)	pH	Materiais Suspensos (mg/L)
Jul/23-Jun/24	28.637	8.949	132	7	343
CONAMA	—	remoção mínima de 60%	100	5,0 a 9,0	remoção mínima de 20%

Fonte: Aatoria própria, 2024.

Com base nas análises efetuadas pela CETREL, observou-se um efluente altamente complexo em relação a matéria orgânica e salinidade com carga de DQO podendo chegar a concentrações até 30 mil; além da relação de biodegradabilidade alta (DQO/DBO), o que impossibilita o uso de tratamento com Biorreator com Membranas – MBR (Membrane Bioreactor) ou o desenvolvimento de um leito móvel para degradar matéria orgânica que é o MBBR (Moving Bed Biofilm Reactors), segundo Stephenson (2000), cargas elevadas de DQO podem levar a um acúmulo excessivo de sólidos e compostos orgânicos nas membranas, resultando em fouling (obstrução) e reduzindo a eficiência do sistema. Isso exige limpeza frequente das membranas e pode diminuir a vida útil dos equipamentos.

Conforme Henze et al. (2002), a salinidade elevada pode afetar a osmose reversa e outros processos de separação, resultando em menor eficiência na filtração. Além de que, a alta concentração de sais dissolvidos na água, pode impactar negativamente a microbiota necessária para a biodegradação, reduzindo a eficiência do tratamento. Embora uma alta relação DQO/DBO possa indicar baixa biodegradabilidade, como mencionado por Silva

(2012), a presença de compostos tóxicos ou inibidores pode interferir na atividade microbiológica, resultando em um tratamento menos eficaz. Dessa forma os custos operacionais em sistemas de MBR podem aumentar significativamente devido à necessidade de manutenção frequente das membranas e limpeza decorrente do fouling.

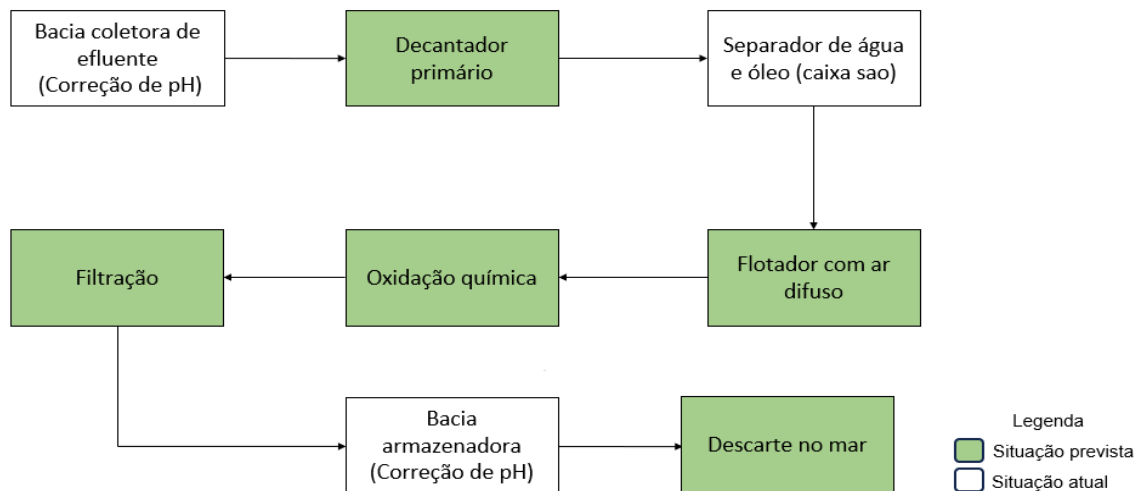
Condutividade elevada – valores que podem ser maiores do que 10.000 – que causa interferência nas tecnologias aplicadas; Sólidos suspensos elevados; Óleos e graxas; variação de pH , mesmo com a neutralização já realizada antes de ser enviada para CETREL e vazão diária baixa.

Com a bacia armazenadora de 400 m<sup>3</sup> disponível, optar por um decantador primário retangular pode ser mais econômico e prático. Sua forma se adapta melhor ao espaço disponível, reduzindo custos de construção e facilitando a instalação. Além disso, a eficiência na sedimentação pode ser aumentada, aproveitando o volume da bacia existente. Portanto, a escolha do decantador retangular é vantajosa em termos de custos e integração com a infraestrutura já disponível.

Realizar a neutralização após a flotação, oxidação química e filtração é importante por várias razões. Primeiramente, ela garante que o pH do efluente tratado esteja dentro de limites seguros para descarte ou para processos biológicos subsequentes, evitando impactos negativos no meio ambiente (Rodriguez *et al.*, 2016). Além disso, a neutralização ajuda a reduzir a toxicidade de subprodutos químicos gerados durante a oxidação e outros processos, tornando o efluente mais seguro (Zhang *et al.*, 2017).

Dessa forma, principalmente para atender aos padrões de projeção ao mar a rota tecnológica escolhida será um sistema para ajuste de pH na entrada e saída do processo, decantador primário para remoção dos sólidos em suspensão e matéria orgânica sedimentável em efluentes; flotador com ar difuso para remover sólidos suspensos, óleos e graxas de efluentes e DQO, oxidação química para degradação de compostos orgânicos presentes no efluente por meio de agentes oxidantes, como ozônio ou peróxido de hidrogênio; sistema de filtração contendo filtro de areia, para remover partículas finas, turbidez e poluentes restantes após os tratamentos primário e secundário conforme segue na figura abaixo:

Figura 3 - Esquemático da Estação de Tratamento de Efluente Prevista



Fonte: Autoria própria, 2024.

Em relação aos valores obtidos, notou-se que o tratamento para o pH e sólidos suspensos está de acordo aos dados exigidos. Entretanto, as taxas de DBO e Materiais suspensos estão acima dos valores requeridos pelo órgão regulamentador. Diante disso, é evidenciado que existe margem e ganhos reais reduzindo os valores de DQO. Para isso, será implementado como melhoria a escolha e utilização de equipamentos com a capacidade de tratar no efluente, o DQO, DBO e Materiais suspensos.

#### 4.2 Dimensionamento

Para que o efluente orgânico seja tratado adequadamente, a estação de pré-tratamento foi dimensionada para comportar toda a carga e sua característica, conforme demonstrado na tabela 6.

Tabela 6 - Dados de entrada do processo

vazão média (m <sup>3</sup> /h)	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	Óleos e Graxas (mg/L)	pH	Materiais Suspensos (mg/L)
3,0	30.000	10000	150	7	350

Fonte: A autoria própria, 2024.

#### 4.2.1 Preliminar

- Dimensionamento Decantador primário retangular

A Figura 4, ilustra um decantador horizontal, cujo funcionamento é dividido em diferentes zonas funcionais: Uma zona de entrada ou turbulência, onde a água é distribuída uniformemente; a zona de decantação, onde as partículas sólidas começam a sedimentar devido à redução da velocidade do fluxo; uma zona de repouso, localizada no fundo, onde os sólidos sedimentados se acumulam e zona de ascensão é uma área onde a água clarificada sobe após a decantação, permitindo que os sólidos sedimentados permaneçam no fundo enquanto a água flui para a saída do sistema.

Figura 4 - Decantador primário



Fonte: Adaptado de GAUTO e ROSA, 2011.

Conforme a NBR 12209 (2011, p. 6), a taxa de escoamento superficial é definida como a relação entre a vazão afluyente do líquido em uma unidade de tratamento e a área horizontal sobre a qual essa vazão é distribuída, medida em  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ .

A área do decantador é determinada a partir da equação de taxa de escoamento superficial, conforme equação abaixo:

$$Tx\ escs = \frac{Q\ máx}{A\ dec \times N\ dec}$$

$$A = \frac{Q\ máx}{T\ esc\ sup \times N\ dec} \quad \text{Equação 1}$$

Onde :

A = área para um decantador primário (m<sup>2</sup>);

Q<sub>máx</sub> = vazão máxima afluyente (m<sup>3</sup>/d);

N<sub>dec</sub> = número de decantadores (N<sub>dec</sub> = 1);

T<sub>x escs</sub> = taxa de escoamento superficial (T<sub>x escs</sub> = 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d).

Em relação ao volume de acordo com a NBR 12209 (2011, p. 15), o volume útil do decantador primário é definido como o produto da área de decantação pela profundidade mínima adotada .

$$V = A \times H \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

V = volume útil de um decantador, em m<sup>3</sup>;

A = área do decantador primário (m<sup>2</sup>);

H = Altura do nível mínimo de água no decantador.

Tempo de detenção hidráulica (TDH)

$$TDH = \frac{V}{Q} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

TDH = tempo de detenção hidráulica, em h;

V= volume útil total dos decantadores (m<sup>3</sup>);

Q = vazão considerada, em m<sup>3</sup>/h.

A NBR 12209 (2011, p. 6) define o tempo de detenção hidráulica como a relação entre o volume útil de uma unidade de tratamento e a vazão afluyente, expresso em horas ou dias.

De acordo com a NBR 12209 (2011, p. 15), as dimensões do decantador retangular devem observar uma relação mínima de 2:1 entre a largura e a profundidade da água.

O comprimento dos decantadores (L) foi calculado com base na equação, respeitando que a relação entre comprimento e profundidade deve ser igual ou superior a 4:1 ( $L/b \geq 4$ ) e que a relação entre comprimento e largura deve ser de pelo menos 2:1.

$$\begin{aligned} \text{largura/altura} &= 2:1 & \text{Equação 4} \\ L &= 2 * h \end{aligned}$$

Onde:

L= comprimento do decantador, em m;

A = área do decantador (m<sup>2</sup>);

b = largura do decantador (m).

Velocidade horizontal de escoamento (vh esc)

$$vh\ esc = \frac{Q}{b * H} \quad \text{Equação 5}$$

No qual:

vh esc = velocidade horizontal de escoamento, em m/s;

Qmáx = velocidade máxima ( m<sup>3</sup>/s);

B = largura do decantador (m);

H = profundidade mínima do decantador (m).

Área superficial - utilizando a equação 4

$$As = L * b \quad \text{Equação 6}$$

Onde :

As = área superficial do decantador, em m<sup>2</sup>;

b = largura do decantador (m);

L = comprimento do decantador (m);

Vazão de Saída

$$Q\ saída = Q\ ent - \text{Vazão de sólidos removidos} \quad \text{Equação 7}$$

No qual:

Q saída= vazão de saída;

Q ent = vazão de entrada.

A vazão de sólidos removidos pode ser calculada a partir da concentração de sólidos no efluente e a eficiência do decantador. Se a concentração de sólidos suspensos na entrada for C ent (em kg/m<sup>3</sup>) e a remoção for R (em %).

$$\text{Vazão de sólidos removidos} = Q\ ent \times C\ entrada \times \left(\frac{R}{100}\right) \quad \text{Equação 8}$$

Segundo Peleteiro, a quantidade de lodo a ser descartado, resultante da remoção do SST em cada decantador, é calculada com base na vazão média afluyente de cada unidade ( $m^3/dia$ ), na concentração de SST no afluyente ( $mg/l$ ) e na eficiência de remoção de SST, utilizando a seguinte fórmula:

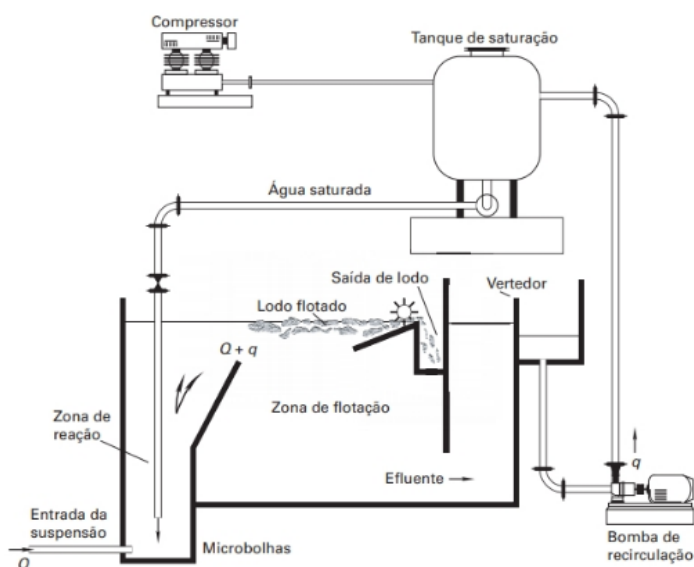
$$M_{SST,removida\ por\ decantador} = \frac{Q_{média}}{N_{dec}} \times sst \times \eta_{sst} \quad \text{Equação 9}$$

#### 4.2.2 Primário

- Dimensionamento Flotador com ar difuso

Na Figura 5, destaca-se o difusor de ar, responsável pela geração uniforme das microbolhas, a zona de separação/ flotação, onde ocorre a aglutinação e elevação das partículas, o raspador de lodo, que remove o material flotado acumulado na superfície, e a área de saída de água clarificada, por onde o líquido tratado é coletado.

Figura 5 - Flotador com ar difuso



Fonte: Richter (2009)

Para o processo de dimensionamento, foi empregado o modelo proposto por Edzwald *et al.* (1990), que descreve a colisão e a adesão das microbolhas aos flocos por meio dos fenômenos de difusão, interceptação e sedimentação em condições de fluxo laminar. Assim, este dimensionamento refere-se a um flotador com ar difuso por recirculação pressurizada, onde parte do efluente clarificado é reenviada para o processo de saturação (Silvestre, 2019).

Deste modo, é necessário calcular a razão de recirculação (Tr), a mesma é calculada a partir da equação:

$$Tr = \frac{q}{Q} \quad \text{Equação 10}$$

No qual:

q = representa a vazão de retorno (m<sup>3</sup>/s);

Q = é a vazão de entrada (m<sup>3</sup>/s).

Para determinar a concentração de saturação utiliza-se da lei de Henry definida pela equação a seguir:

$$C_{o_{sat}} = \eta K_{Henry} P \quad \text{Equação 11}$$

No qual:

$\eta$  = eficiência no tanque de saturação;

$K_{Henry}$  = constante da lei de Henry;

P = pressão absoluta (atm).

Utiliza-se da equação 12

$$\varphi_{ar} = (1 + Tr) Q \frac{C_{ar}}{P_{sat}} \quad \text{Equação 12}$$

Para calcular a quantidade de ar ( $\varphi_{ar}$ ) que a câmara de saturação deve fornecer para o processo do Flotador com Ar Difuso (FAD).

Em que:

$P_{sat}$  = densidade do ar saturado com vapor de água;

$C_{ar}$  = concentração de massa de ar por volume unitário de efluente.

Sendo  $C_{ar}$  definido por:

$$C_{ar} = \frac{Tr}{1+Tr} (C_{sat} - C_{aTr}) \quad \text{Equação 13}$$

Para se calcular a concentração de ar na água de recirculação na saída do tanque de saturação, que opera à pressão atmosférica, utiliza-se da seguinte equação:

$$C_{aTr} = K_{Henry} P \quad \text{Equação 14}$$

Em seguida, calcula-se ( $\omega a$ ) um valor adimensional que representa a concentração em volume de ar liberado na zona de contato da água saturada com o efluente

$$\omega a = \frac{C_{ar}}{P_{sat}} \quad \text{Equação 15}$$

A partir do  $\omega a$ , é possível calcular o número de bolhas ( $N_b$ ) liberadas por unidade de volume utilizando a seguinte equação:

$$N_b = \frac{6 \omega a}{\pi d_b^3} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:  $d_b$  = diâmetro da bolha ( $\mu\text{m}$ ).

Para a operacionalidade do FAD, é necessário um saturador, o que implica na necessidade de seu dimensionamento. Portanto, para o adequado funcionamento do saturador, este deve ser abastecido com água resultante de uma fonte externa, complementada por uma pequena fração da vazão de retorno ( $q$ ) após o tratamento (Silvestre, 2019).

Conforme a NBR 12209, a taxa de escoamento superficial é definida como a relação entre a vazão do efluente líquido de uma unidade de tratamento e a área horizontal na qual esse efluente é distribuído.

Portanto a taxa de escoamento superficial é definida como

$$T_{es} = \frac{q}{V_s} \quad \text{Equação 17}$$

Sendo:

$V_s$  = área da seção transversal do vaso de saturação ( $\text{m}^2$ ).

É imprescindível calcular a carga hidráulica, pois esta estabelece o fluxo de massa de ar dissolvido por área unitária do tanque. Essa carga hidráulica é definida pela equação a seguir:

$$C_h = \rho T_{es} \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

$\rho$  = densidade da água (kg/m<sup>3</sup>).

Sendo assim, incorporando a equação 17 na equação 18 se tem:

$$VsC_h = \rho q \quad \text{Equação 19}$$

A eficiência do Flotador com ar difuso é influenciada pela quantidade e pelo tamanho das microbolhas geradas na zona de contato (Silvestre, 2019). Portanto o diâmetro é definido por:

$$d_{nb} = 4 \frac{\sigma}{\Delta P} \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

$\sigma$  = tensão superficial da água (N/m);

$\Delta P$  = diferencial de pressão (Pa).

Com isso, realiza-se o dimensionamento do tanque de flotação. O cálculo da área de flotação é determinado a partir de:

$$F_{\text{área}} = \frac{Q + q}{T_{es}} \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

Q = vazão do efluente;

q = vazão de retorno;

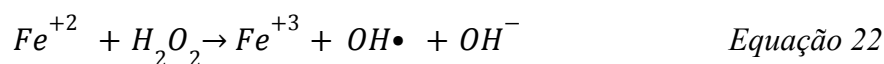
$T_{es}$  = taxa superficial.

### 4.3.3 Terciário

- Oxidação avançada - Fenton

Segundo Seckler (2017), a oxidação química é amplamente aplicada no tratamento de água potável para resolver diversos tipos de problemas. Os principais oxidantes utilizados nesse processo são cloro, permanganato de potássio, dióxido de cloro, ozônio e peróxido de hidrogênio. A escolha do agente oxidante adequado depende de várias condições, como a especificidade do problema e fatores econômicos e ambientais.

A decomposição catalítica do peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) pelos íons ferrosos ( $Fe^{2+}$ ) para gerar radicais hidroxila ( $OH\bullet$ ) é um processo fundamental em métodos de oxidação avançada, como o processo Fenton. A reação ocorre de acordo com a seguinte equação:



Nessa reação, os íons  $Fe^{2+}$  catalisam a decomposição do peróxido de hidrogênio, gerando radicais hidroxila ( $OH\bullet$ ), que são altamente reativos e responsáveis pela degradação da matéria orgânica presente em águas residuais ou outros meios. Esse processo é amplamente utilizado para tratar poluentes orgânicos, devido à alta reatividade dos radicais  $OH\bullet$ , que atacam uma vasta gama de compostos orgânicos.

O tratamento inicia no tanque de oxidação, onde a água residuária é misturada com ácido para ajuste de pH, peróxido de hidrogênio (oxidante) e sulfato ferroso heptahidratado (catalisador). Em seguida, ocorre a neutralização com hidróxido de sódio, que decompõe o peróxido residual e precipita os sais de ferro como hidróxidos. A floculação e decantação finalizam o processo, facilitando a remoção do lodo formado (Bautista, 2008 ; Queiroz, 2011 e Adário, 2014).

A dosagem de peróxido de hidrogênio e sulfato de ferroso heptahidratado, bem como o pH, está interligada a fatores específicos: a quantidade de peróxido de hidrogênio está relacionada diretamente ao teor de matéria orgânica, enquanto a quantidade de sulfato de ferroso heptahidratado está diretamente vinculada a concentração de peróxido de hidrogênio (Loures, 2011; Soares, 2018).

Conforme Fonseca (2023), a partir do valor de DQO do efluente bruto, obtido durante a caracterização, é possível calcular as dosagens de reagentes permitidas para o ensaio de

tratabilidade. O DQO é utilizado para determinar a dosagem de  $H_2O_2$ , com base nas condições estequiométricas descritas nas equações de 23 a 27.



Sendo assim, o cálculo teórico de  $H_2O_2$  pode ser dado pela equação.

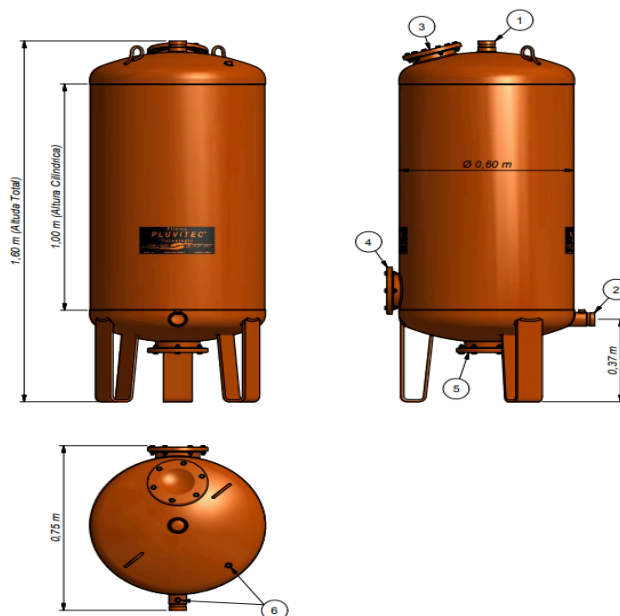
$$H_2O_2 = \text{Fator} \times 2,125 \times \text{DQO} \quad \text{Equação 27}$$

Experimentos fatoriais 2k são um tipo de delineamento experimental utilizado para avaliar o efeito de múltiplos fatores (k) sobre uma variável resposta. Cada fator é estudado em dois níveis (geralmente alto e baixo), e todas as possíveis combinações desses níveis são testadas. A principal vantagem desse tipo de experimento é a capacidade de estimar não apenas os efeitos principais de cada fator, mas também as interações entre eles.

Em consonância com os estudos de Santos (2010) e Fonseca (2023), Os experimentos fatoriais  $2^k$  permitem a estimativa de todos os "k" efeitos principais de todas as interações de dois fatores, de todas as interações de três fatores, se trabalhou com planejamento de experimento  $2^3$  (2 níveis 3 fatores), analisados em duplicata na modelagem de concentração dos reagentes e tempo de reação. No contexto do seu experimento  $2^3$ , os fatores mencionados são: Concentração inicial dos reagentes: Esse fator varia em dois níveis: um nível mais baixo e um nível mais alto da concentração e tempo de reação: Assim como a concentração, o tempo de reação também varia em dois níveis: um tempo mais curto e um tempo mais longo.

O ferro, empregado como catalisador no processo, está diretamente relacionado à concentração de peróxido de hidrogênio. Conforme Loures (2011), a relação mássica ideal de  $H_2O_2/Fe^{2+}$  no Processo Fenton varia de 6,1 a 24,3. Já Fonseca (2023) aponta que a proporção usual entre  $[Fe^{2+}]$  e  $[H_2O_2]$ , em massa, encontra-se entre 1:5 e 1:10. Esses experimentos serviram de base para determinar as proporções dos reagentes no delineamento experimental.





Fonte: Adaptado de Hidro solo, 2024.

Para os cálculos do dimensionamento, foram referenciados os padrões de NBR 13969 (1997) e NBR 12216 (1992) para determinação dos elementos construtivos da etapa de filtração. Vazão utilizada de 65,75 m<sup>3</sup>/dia e a taxa de filtração observando quanto ao valor pré-estabelecido nas referências para filtros com leito filtrante de camada dupla.

Para verificar a quantidade de filtros que serão usados utiliza-se a equação 28

$$N = 1,4 \sqrt{C} \quad \text{Equação 28}$$

Em que:

N = número de filtros (quantidade);

C = Capacidade de produção (10<sup>6</sup> L/dia).

Portanto para calcular a vazão média por filtro se utilizou da equação 29

$$QF = \frac{Q}{N} \quad \text{Equação 29}$$

No qual:

QF = vazão média de operação por filtro (m<sup>3</sup>/dia);

Q = vazão tratada (m<sup>3</sup>/dia);

N = número de filtros.

Em seguida calcula-se a área de filtração pela equação 30

$$AF = \pi \frac{D^2}{4} \quad \text{Equação 30}$$

Onde:

AF = área da seção de escoamento (m<sup>2</sup>);

D = diâmetro da seção de escoamento (m).

Deste modo para se calcular a taxa de filtração, utiliza-se da seguinte equação

$$TF = QF/AF \quad \text{Equação 31}$$

Em que:

TF = taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>. dia);

QF = vazão média de operação por filtro (m<sup>3</sup>/dia);

AF = área da seção de escoamento (m<sup>2</sup>).

Em seguida, calcula-se Atf que vai definir a área total dos filtros

$$Atf = \frac{Q}{TF} \quad \text{Equação 32}$$

No qual:

Q = Vazão tratada, m<sup>3</sup>/dia;

TF = taxa de filtração (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> . dia);

Atf = Área total do filtro(m<sup>2</sup>).

Após isso pode-se definir a área de cada filtro pela equação a seguir:

$$Af = \frac{Atf}{N} \quad \text{Equação 33}$$

em que:

N = Número de filtros;

Atf = Área total do filtro;

Af = Área de cada filtro.

Calcula-se a vazão mínima necessária para a água de lavagem:

$$Q_{lav} = V_{asc} \times A_{if} \quad \text{Equação 34}$$

Onde:

QLAV: vazão da água de lavagem dos filtros (m<sup>3</sup>/s);

Vasc: velocidade ascensional da água de lavagem (m/s);

AF: área horizontal do filtro (m<sup>2</sup>).

## 5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Dimensionamentos

#### 5.1.1 Preliminar

- Decantador primário retangular

Para o cálculo do decantador, foram considerados os parâmetros físico-químicos do resíduo e a vazão necessária para o tratamento, além dos valores mencionados. A vazão máxima e média do afluyente foram levadas em conta para evitar transbordamentos, erros no tempo de detenção e a perda de capacidade do tratamento. De acordo com a NBR 12209/1992, a taxa de escoamento superficial do decantador primário deve ser de  $60 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  quando não precede um processo biológico,  $80 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  quando precede um processo de filtração biológica e  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$  quando precede um processo de lodos ativados. Como o decantador primário escolhido não precede nenhum desses processos, foi definida uma taxa de escoamento superficial de  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ , conforme a NB-570, para um decantador primário de fluxo horizontal que remove 70% dos sólidos em suspensão (SS). A altura mínima de água recomendada pela norma é de 2,0 m. A norma também indica que, para vazões de dimensionamento superiores a 250 L/s, devem ser usados mais de um decantador, mas como a vazão máxima é de 0,7610 L/s, foi adotada a utilização de duas unidades para facilitar a operação e a manutenção do sistema.

Com base nesses parâmetros, a área de decantação inicial foi calculada para duas unidades, resultando em  $1,64 \text{ m}^2$ . O volume do decantador foi calculado em  $3,29 \text{ m}^3$  para cada unidade e  $6,58 \text{ m}^3$  para as duas unidades. A detenção hidráulica foi de 2 horas e 40 minutos, dentro do ideal, pois permite a sedimentação adequada dos sólidos. A NBR 12209 estabelece que o tempo de detenção hidráulica para a vazão média deve ser inferior a 6 horas e, para a vazão máxima, superior a 1 hora. A norma também especifica, para decantadores retangulares, as relações mínimas de 4:1 para comprimento/altura e 2:1 para largura/altura. Com essas relações, a largura do decantador foi determinada como 4 metros, e o comprimento foi calculado para coincidir com essas proporções, proporcionando um design adequado. A área superficial dos decantadores foi recalculada para  $8 \text{ m}^2$ , com volume de  $16 \text{ m}^3$  e tempo de detenção hidráulica de 5,84 horas, em conformidade com a norma.

A velocidade horizontal de escoamento foi calculada em  $0,10 \text{ mm/s}$ , o que atende ao limite máximo de  $50 \text{ mm/s}$  estabelecido pela norma, favorecendo a sedimentação e

minimizando a re-suspensão dos sólidos decantados. A área total do decantador é de 32 m<sup>2</sup>, garantindo a segurança entre os equipamentos e operadores. Quanto à inclinação do fundo, a norma estabelece a relação 1,5 metros na vertical por 1,0 metro na horizontal para facilitar o escoamento do lodo. Os poços de lodo podem ser circulares ou quadrados, com poços cônicos ou piramidais de base quadrada, com uma inclinação mínima de 1,5 metro na vertical por 1,0 metro na horizontal e diâmetro ou diagonal não superior a 7,0 metro. Utilizando as equações e gráficos da NB-570, a remoção de sólidos em suspensão foi de 60%, enquanto a remoção de DBO5 foi de 35% confirmando com o que também é informado pela CETESB, (2018), a eficiência na remoção de DBO é de 25 a 35% e de SS é de 40 a 60%.

A vazão de saída e a concentração de DBO e SST foram calculadas, e a massa de lodo removido em cada decantador foi determinada conforme a equação 9.

Tabela 7 - Resultados do dimensionamento do decantador primário retangular

<b>Referência</b>	<b>Resultados do dimensionamento do Decantador</b>		
Equação 1	Cálculo da área	1,64	m <sup>2</sup>
Equação 2	Volume	16,00	m <sup>3</sup>
Equação 3	Tempo de detenção hidráulica	5,84	horas
Equação 4	Largura do decantador	2,00	m
Equação 5	Vazão de saída DBO	0,01	m <sup>3</sup> /s
Equação 6	Área superficial	8,00	m <sup>2</sup>
Equação 7	Removidos SST	34,29	(mg/L)/dia
Equação 7	Removidos DBO	1.607,07	(mg/L)/dia
Equação 8	Vazão de saída SST	14,698	(mg/L)/dia
Equação 8	Vazão de saída DBO	3.119,6	(mg/L)/dia
Equação 9	Massa de lodo removida	304,54	kg/dia

Fonte: Autoria própria, 2024.

### 5.1.2 Primário

- Flotador por ar difuso

A vazão de entrada estabelecida no sistema é de 2,74 m<sup>3</sup>/h. Segundo a Codeba (2024), a temperatura média no Porto de Aratu, local onde está localizado a ETE é de 26 °C. A pressão atmosférica considerada durante o dimensionamento foi de 1 atm, uma vez que o

local está ao nível do mar. Com isso foi dimensionado os seguintes equipamentos: tanque de flotação, vaso saturador e um sistema de pressurização.

Para o cálculo do flotador, além dos valores previamente estabelecidos, foram consultados os dados de Moruzzi e Reali (2007) para determinar a vazão de recirculação. Para a concentração de saturação, foram utilizadas as constantes da lei de Henry para o ar a 25°C. Para definir a eficiência do tanque e a saturação, utilizou-se a pesquisa de Fonseca (2017), que indica uma eficiência de 87% para esse tipo de tanque. A quantidade de ar necessária que a câmara de saturação deve fornecer ao processo do FAD foi calculada com base na densidade do ar saturado a essa temperatura. A taxa de escoamento superficial foi obtida por meio de pesquisas com fornecedores, resultando na escolha de um tanque com diâmetro de 1,2 metros e altura de 1 metro, confeccionado em ferro fundido.

A eficiência do flotador por ar difuso para remoção de sólidos suspensos, óleos e graxas, DQO (Demanda Química de Oxigênio) e DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) pode variar de acordo com as condições específicas do sistema. A eficiência na remoção de DBO pode variar de 40% a 75% em processos com flotadores por ar difuso. Segundo Kovaltchuk, a eficiência média de remoção de DQO na FAD é de  $57\% \pm 13\%$ , com variação entre 32% e 82%. Além disso, em 75% das medições analisadas, o valor observado foi superior a 51%.

O flotador por ar difuso é bastante eficaz na remoção de óleos e graxas, com uma eficiência de remoção que pode atingir de 80% a 95%, especialmente quando a formação de bolhas finas é otimizada, facilitando a flotação dessas substâncias lipofóbicas. Segundo Ferreira (2011) nas condições do experimento testado, níveis de remoção superiores a 95% nas concentrações de rejeitos de óleo pelo FAD.

Tabela 8 - Resultados do dimensionamento do Flotador com ar difuso

<b>Referência</b>	<b>Resultados do dimensionamento do Flotador com ar difuso</b>		
Equação 10	Razão de recirculação	0,1	Adimensional
Equação 11	Concentração de saturação	101,95	mg/L
Equação 12	Quantidade de ar	0,001	m <sup>3</sup> /s
Equação 13	Concentração de massa de ar	7,30	mg/L

Tabela 8 - Resultados do dimensionamento do Flotador com ar difuso

Referência	Resultados do dimensionamento do Flotador com ar difuso		
Equação 14	Concentração de ar na água	21,70	mg/L
Equação 15	Concentração em volume de ar liberado	6,28	Adimensional
Equação 16	Número de bolhas	1,34*10 <sup>-5</sup>	bolhas/m <sup>3</sup>
Equação 17	Taxa de escoamento superficial	1*10 <sup>-4</sup>	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> · s
Equação 18	Carga hidráulica	0,0671	kg/m <sup>2</sup> · s
Equação 20	Diâmetro dos núcleos de bolhas	29,5*10 <sup>-6</sup>	m
Equação 21	Área de flotação	12,43	m <sup>2</sup>

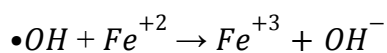
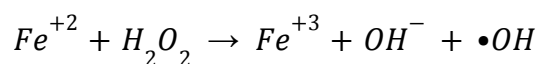
Fonte: Autoria própria, 2024

### 5.1.3 Terciário

- Oxidação avançada fenton

De acordo com Sarmiento (2013), o radical hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ) produzido na conversão reage de forma rápida com compostos orgânicos. Esse radical tem demonstrado alta reatividade com diversas substâncias, como álcoois, éteres, fenóis clorados, pesticidas e outros compostos presentes em soluções aquosas de águas residuais.

Segundo Fonseca (2023) o ferro empregado como catalisador na reação apresenta uma relação direta com a concentração de peróxido de hidrogênio.



Sendo assim, o cálculo teórico de  $\text{H}_2\text{O}_2$  pode ser dado pela equação.

$$\text{H}_2\text{O}_2 = \text{Fator} \times 2,125 \times \text{DQO} \quad \text{Equação 27}$$

Sabendo-se que as três variáveis relevantes para Processo Fenton são: pH, peróxido de hidrogênio e sulfato ferroso utilizou-se o planejamento fatorial completo  $2^3$  para determinar a

influência dessas variáveis frente a redução de DQO, DBO, SST e turbidez e através deste monitoramento identificar a condição ótima de tratamento.

Diferentes estudos exploraram a otimização de tratamentos para lixiviado bruto, utilizando faixas variadas de fatores. Moraiva (2010) e Silva (2018), por exemplo, avaliaram fatores entre 0,5 e 1,5, enquanto Brasil (2018) fixou em 0,7 e 1,3. No estudo de Santos (2010), os fatores selecionados para os ensaios de tratabilidade foram 1,0 e 1,4, resultando na multiplicação dos valores de DQO por 2,125 e 3, respectivamente.

Já de acordo com Fonseca (2023) foi utilizado um fator de 1,0 a um pH de 3,0.

O Fator 1 está sendo utilizado para representar parâmetro experimental específico conforme experimentos, como o tempo de reação, a temperatura ou a concentração inicial de um contaminante. E o pH 3 pois nesse pH, a solubilidade dos íons ferrosos é máxima, garantindo a disponibilidade do catalisador para a reação; O pH ácido favorece a formação de radicais hidroxila, que são os principais responsáveis pela oxidação dos compostos orgânicos; Pode ocorrer a precipitação de hidróxidos de ferro, reduzindo a concentração de íons ferrosos disponíveis para a reação e embora o pH muito baixo possa acelerar a decomposição do peróxido de hidrogênio, o valor de 3,0 geralmente garante uma estabilidade razoável desse reagente.

Dessa forma:

$$H_2O_2 = \text{Fator} \times 2,125 \times \text{DQO}$$

$$H_2O_2 = \text{Fator} \times 2,125 \times 3355,0 \text{ mg/l}$$

$$H_2O_2 = 7.086,87 \text{ mg/l}$$

$$H_2O_2 = 0,0071 \text{ kg/l}$$

Utilizando a relação entre os reagentes de 1:5 temos o cálculo para Sulfato Ferroso Heptaidratado ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )

$$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 1.417,37 \text{ mg/l}$$

$$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 0,00142 \text{ kg/l}$$

De acordo com Queiroz (2011), o processo Fenton homogêneo foi capaz de atingir uma eficiência de 80,6% na remoção de DQO (Demanda Química de Oxigênio) durante o tratamento de efluentes têxteis. Embora existam resultados entre outros parâmetros, grande parte dos estudos está voltada para a eficiência na remoção do COD (Carbono Orgânico Dissolvido), que representa uma parte específica da matéria orgânica.

- Filtração com areia e carvão ativado

Como referência para os cálculos realizados, foi considerada a vazão de alimentação da planta, proveniente da oxidação química, com um fluxo de aproximadamente 65,75 m<sup>3</sup>/dia.

A Estação de Tratamento de Efluentes em desenvolvimento contará com um total de 1 filtro, resultado encontrado através da equação 25 que nos mostra qual a quantidade de filtros necessários para tratar o efluente em questão. Aplicando a equação 26, foi determinada a vazão média do filtro, que é de 65,75 m<sup>3</sup>/dia. As dimensões dos filtros utilizados foram definidas de acordo com os padrões de mercado, conforme os orçamentos realizados, sendo de o diâmetro necessário, para essa vazão de tratamento de 0,6 metros, o que através da equação 27 com a área em torno de 0,28 m<sup>2</sup>.

Através da equação 28 temos um dos aspectos mais importantes de trabalho que é a taxa de filtração que por intermédio da norma NBR 12216 (1992) nos diz que esse valor tem que estar entre 180 a 360 m<sup>3</sup>/ m<sup>2</sup> . dia. E a razão entre a vazão de operação e a área do filtro resulta em uma taxa de 232,6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> .

Refletindo a uma taxa de filtração com parâmetro condizente conforme NBR 12216, para filtros de dupla camada. Para este processo, decidiu-se pela utilização de uma camada composta por carvão ativado e areia.

As linhas de saída (crepinas) permitem que o líquido, após a filtração, seja direcionado, sendo comercialmente conhecidas como blocos Pluvitec. Esses blocos são compostos por tubos de PVC dispostos paralelamente, onde são instaladas as crepinas que conduzem o líquido até a linha de saída dos filtros.

Utilizando a equação 29, é possível determinar o espaço necessário para a instalação do sistema de filtragem, ou seja, a área de cada filtro, que é de aproximadamente 0,28 m<sup>2</sup>.

Com esse resultado, é possível calcular a área total do filtro, que pode ser determinada pela equação 30. A área aproximada para cada filtro foi calculada em 0,28 m<sup>2</sup>, portanto, é fundamental disponibilizar uma área com cerca de 30% acima da necessária para a

construção. Facilitando assim a movimentação e a possíveis manobras ou manutenções que venham a ser realizadas no sistema. Sendo assim a área disponibilizada para a operação de filtração é de 0,57 m<sup>2</sup> devido aos elementos de construção e que são instalados no filtro.

Na figura 6, é possível observar o sistema de filtragem, que conta com 1 filtro. A imagem também ilustra alguns pontos que foram levados em consideração no dimensionamento, a saber, a boca de visita, o tripé de sustentação e local de saída da água filtrada. Que foram referenciados como elementos inerentes ao filtro e por fim aumentado a sua área de instalação.

Para a remoção de DBO com carvão ativado a eficiência está entre 66 a 68% (Lucena, 2018). Segundo Fernandes (2021) realizaram um estudo sobre o tratamento de efluentes de um parque industrial, utilizando um processo de filtração em areia seguido de carvão ativado. Os resultados indicaram uma remoção de 72% de sólidos suspensos e 86% de turbidez, destacando a eficácia dessa combinação no tratamento e purificação da água.

Tabela 9 - Resultados do dimensionamento do filtro de areia

<b>Referência</b>	<b>Resultados do dimensionamento do Filtro de carvão ativado</b>		
Equação 28	Quantidade de filtros	01	quantidade
Equação 29	Vazão média de operação por filtro	65,75	m <sup>3</sup> /dia
Equação 30	Área de filtração	0,28	m <sup>2</sup>
Equação 31	Taxa de filtração	232,6	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> . dia
Equação 32	Área total do filtro	257,4	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> . dia
Equação 33	Área de cada filtro	0,65	m <sup>2</sup>
Equação 34	Vazão mínima de lavagem	12,73	m <sup>3</sup> /h

Fonte: Autoria própria, 2024.

## 5.2 Análise econômica do projeto

Para a construção da ETE, é fundamental considerar diversos custos, incluindo os relacionados à construção civil, à aquisição de equipamentos e ao consumo de produtos químicos. Assim, é importante levar em conta tanto os custos fixos quanto os variáveis.

O investimento em construção civil inclui os gastos com materiais e mão de obra para a edificação. O custo por  $m^3$  do concreto armado, é de R\$450,00.

Os preços de aquisição e montagem de cada equipamento foram obtidos por meio de orçamentos com empresas do setor, baseando-se nos dimensionamentos calculados. Esses dimensionamentos foram fornecidos para facilitar a fabricação, de acordo com o que é comercializado.

Em relação aos valores das bombas, foram utilizadas as especificações técnicas das bombas já existentes no sistema para elaborar o orçamento de novas unidades. Assim, foi realizado o orçamento de duas bombas submersíveis de 20 CV e duas bombas centrífugas de 25 CV.

O valor do decantador foi calculado considerando o custo dos materiais utilizados, incluindo concreto armado, vergalhão de aço, areia e brita, todos quantificados em metros cúbicos com base na área do projeto. Para uma área total de  $16 m^3$ .

O floculador foi selecionado após uma pesquisa de mercado que levou em consideração diversos fatores, incluindo a localização do fabricante, o que favoreceu a logística de transporte e entrega. Este modelo destaca-se por seu baixo custo de manutenção e por exigir uma área reduzida para instalação. Com uma capacidade máxima de  $5 m^3/h$ , o floculador facilita a operação da planta, uma vez que não será necessário operar com o volume total disponível. Além disso, o equipamento conta com assistência técnica permanente.

O filtro de areia, com base nos dados calculados e enviados aos fabricantes, apresentou um dimensionamento e custos mais coerentes, fornecidos pela Hidro Solo, uma empresa brasileira atuante no setor desde 1981. Com as informações de dimensionamento, a empresa descreveu o modelo FA400, que possui um corpo de 600 mm de diâmetro e 1.000 mm de altura, além de uma capacidade de 300 kg para o elemento filtrante. O pacote inclui também engates Victaulic, niples e derivações para a montagem do sistema. É importante destacar as características técnicas do equipamento:

- Vazão de retrolavagem:  $20 m^3/h$ , superior à mínima de  $12,73 m^3/h$ ;
- Taxa de filtração:  $12,27 m^3/m^2.h$ , demonstrando eficiência acima da requerida de  $9,69 m^3/m^2.h$ , ou  $232,6 m^3/m^2.dia$ , e dentro dos limites estipulados pela NBR 12216.

Vale ressaltar que a proposta tem validade de 30 dias a partir da data dos valores orçados, com impostos inclusos.

Tabela 10 - Resultados da pesquisa orçamentária

<b>Equipamento</b>	<b>Fabricante</b>	<b>Custo Unitário</b>
Decantador primário	Construção In LOCO	R\$ 27.216
Flotador por ar difuso	Águas Claras Engenharia	R\$ 92.342
Filtro de Areia	Hidro Solo	R\$ 11.940
Bomba Centrífuga	Águas Claras Engenharia	R\$ 24.967
Bomba Submersível	Mhtshopping	R\$ 39.679

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os custos variáveis do projeto são determinados pelos produtos químicos, que incluem ácido sulfúrico 98%, peróxido de hidrogênio, sulfato ferro II heptahidratado e soda cáustica, que resultam um valor de R\$ 112.886 anualmente. Além da qualificação da mão de obra operacional com um valor de R\$ 1.900 custo ao ano e do consumo de energia elétrica de anualmente R\$ 183.747, totalizando um custo anual de R\$298.533 conforme tabela 11 de custo variável.

Tabela 11 - Custo variável

<b>Material (Insumos)</b>	<b>Valor em R\$</b>	<b>Unidade</b>
Produtos químicos	9407	Preço R\$/kg
Qualificação da operação	380	Curso/operador
Energia elétrica	15.312	Preço R\$/mês

Fonte: Autoria própria, 2024.

Os custos fixos são definidos pelas taxas e seguros, manutenção preventiva e mão de obra de operação, totalizando um custo anual de R\$398.860.

Tabela 12 - Custo fixo

<b>Custos</b>	<b>Descrição</b>	<b>R\$/ano</b>
Seguros e Taxas	0,5 % do investimento fixo/ano	6.515
Manutenção Preventiva	3% do investimento fixo/ano	39.092
Mão de obra de operação	salário/pessoa/mês	195.000

Fonte: Autoria própria, 2024.

O valor total do investimento foi determinado a partir de diversas categorias. O investimento indireto inclui know-how, projeto básico, projeto de detalhamento, serviços de procura, inspeção, diligenciamento, pré-operação e contingências. Já o investimento direto, classificado como ISBL, abrange a aquisição de terreno e melhorias, equipamentos principais, materiais de aplicação, tubulações, instrumentação, componentes elétricos, isolamentos, pintura, fundações, estruturas, obras civis, montagem industrial, instalação de equipamentos e materiais, instalações provisórias, fretes, seguros, taxas, peças sobressalentes, inventários iniciais, veículos, móveis e utensílios. Além disso, o investimento OSBL contempla sistemas de compressão e distribuição de ar industrial e vapor, distribuição elétrica e sistema de combate a incêndio. Por fim, consideramos também o investimento fixo, que inclui despesas financeiras durante a construção e capital de giro.

Tabela 13 - Investimento total

<b>Investimento</b>	<b>Valor em R\$</b>
<b>Investimento indireto</b>	249.436
know-how	37.793
Projeto básico	22.676
Projeto de detalhamento	45.352
Serviços de procura, inspeção e diligenciamento	22.676

Tabela 13 - Investimento total

<b>Investimento</b>	<b>Valor em R\$</b>
Pré-operação	7.559
Contingências	113.380
<b>Investimento Direto</b>	<b>755.867</b>
<b>Investimento ISBL</b>	<b>755.867</b>
Terreno e melhorias	15.117
Equipamentos principais	299.947
Materiais de aplicação	212.963
Tubulação	137.976
Instrumentação	44.992
Materiais elétricos	20.996
Isolamentos	5.999
Pintura	2.999
Fundações e estruturas	44.992
Obras civis	29.995
Montagem industrial	140.975
Instalação dos equipamentos	59.989
Instalação dos materiais	74.987

Tabela 13 - Investimento total

<b>Investimento</b>	<b>Valor em R\$</b>
Instalações provisórias	5.999
Fretes, seguros e taxas	14.997
Peças sobressalentes	11.998
Inventários iniciais	-
Veículos, móveis, utensílios	-
<b>Investimento OSBL</b>	<b>27.551</b>
Unidade de captação de adução de água variável	-
Unidade de tratamento de água variável	-
Torres de resfriamento variável	-
Sistema de geração de vapor variável	-
Compressão e distribuição de ar industrial e vapor	10.204
Unidade de gás inerte variável	-
Sistema de distribuição de água	-
Tochas variável	-
Parque de tancagem variável	-
Unidade de tratamento de efluentes	-
Subestação elétrica	-

Tabela 13 - Investimento total

<b>Investimento</b>	<b>Valor em R\$</b>
Distribuição elétrica	10.204
Sistema de combate a incêndio	7.143
Edifícios de administração	-
<b>Investimento Fixo</b>	<b>1.020.421</b>
<b>Despesas financeiras durante a construção</b>	<b>102.042</b>
<b>Capital de giro</b>	<b>153.063</b>
<b>INVESTIMENTO TOTAL (R\$)</b>	<b>1.303.078</b>

Fonte: Aatoria própria, 2024.

O fluxo de caixa deve ser estruturado de maneira que o Valor Presente Líquido (VPL) seja superior a zero, a Taxa Interna de Retorno (TIR) ultrapasse 11,25% ao ano (taxa definida pela Selic do ano) e que a relação VPL/INV seja superior a 2, segundo Mustafa (2015). E para realizar os cálculos foi feita a estimativa para um período de 25 anos.

Tabela 14- Fluxo de caixa do processo

VPL ( MM R\$)	7,86	> 0
TIR ( % ao ano)	61%	> 11,25%
VPL/INV	6,0	2
Payback Time	1,6	Anos

Fonte: Aatoria própria, 2024.

Considerando os dados apresentados análise de custo-benefício realizada demonstra a viabilidade técnica e econômica da implantação do sistema de análise da qualidade do

efluente, garantindo a conformidade com as legislações ambientais e contribuindo para a sustentabilidade da operação.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a implementação de um novo processo na empresa A, com o objetivo de melhorar a rentabilidade no tratamento de efluentes e promover a sustentabilidade. A análise revelou que a dependência de serviços terceirizados para o tratamento de efluentes gera um custo significativo, impactando a saúde financeira da organização e destacando a necessidade de soluções com foco em soluções mais econômicas e ambientalmente corretas para o tratamento de efluentes industriais, garantindo a conformidade com a legislação ambiental.

O sistema de tratamento utilizado demonstra uma eficiência satisfatória na remoção dos principais efluentes, com reduções significativas nos níveis de DBO, sólidos suspensos e óleos e graxas. Especificamente, a eficiência na remoção de DBO é de 98,71%, de óleos e graxas é de 95%, e de materiais suspensos é de 98,88%. Esses resultados indicam que a rota de tratamento escolhida é adequada para o manejo desses efluentes, atendendo, portanto, aos padrões de lançamento estabelecidos pelas resoluções do CONAMA, números 430 de 2011 e 357 de 2005.

Tabela 15 - Resultados da eficiência de remoção de poluentes

PARÂMETROS	ENTRADA(mg/l)	SAÍDA(mg/l)
DBO	8948,9	115,10
Sólidos suspensos	345,6	3,84
Óleos e Graxas	129,9	6,6

Fonte: Autoria própria, 2024.

A análise econômica do projeto revela uma situação promissora em termos de viabilidade financeira. Atualmente a empresa enfrenta um custo de R\$1.822.687, enquanto o investimento total para a implementação do sistema é de R\$1.303.077 com o custo de manutenção anual de R\$ 697.393, diminuindo assim 61% do valor gasto atualmente.

Considerando o valor presente líquido (VPL) de 7,86 e uma taxa interna de retorno (TIR) de 61%, demonstra que o projeto é altamente viável, uma vez que a TIR supera a taxa mínima de atratividade de 11,25%. Além disso, a relação VPL/investimento de 6,0 atende ao mínimo desejado, reforçando a atratividade do investimento.

O tempo de payback é de apenas 1,6 anos, ou seja, aproximadamente 1 ano e 8 meses, indicando um retorno rápido sobre o investimento, o que é um fator positivo. Assim conclui-se que a implementação do sistema é economicamente viável.

## **7. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

A gestão do lodo de descarte proveniente da ETE representa um desafio significativo, mas também como uma oportunidade valiosa para o reaproveitamento sustentável. Um estudo realizado pelo Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA) e pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A (Embasa) revela que o lodo pode ser utilizado de diversas maneiras benéficas, como na recuperação de áreas degradadas, na agricultura, na produção de blocos cerâmicos e na cogeração de calor na indústria cimenteira. Essas alternativas não apenas minimizam o impacto ambiental do descarte inadequado, mas também promovem a valorização de um resíduo que, quando tratado adequadamente, pode contribuir para o desenvolvimento sustentável.

Vale ressaltar também que a água tratada traz um leque vasto de possibilidades de reutilização. Das quais tem-se:

- Uso em sistemas de combate a incêndio, aumentando os níveis dos tanques ou lagos de água de combate;
- Água de alimentação das torres de resfriamento (make-up);
- Água de reutilização na lavagem e acondicionamento dos tanques.

## REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 9800/1987 - Projeto de estruturas de aço. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT. NBR - 12209 - NORMAS TÉCNICAS, A.-A. B. Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. Disponível em: <[https://asemae.org.br/politica-de-privacidade/item/download/1493\\_3a093ca19e24c14e0b4041f1c8ed1d07](https://asemae.org.br/politica-de-privacidade/item/download/1493_3a093ca19e24c14e0b4041f1c8ed1d07)>. Acesso em: 20 out. 2024.

ABNT. NBR 12216 - Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, abr. 1992.

ABNT. NBR 13969 - Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, set. 1997.

ABIQUIM. Associação Brasileira da Indústria Química. SISTEMA DE AVALIAÇÃO DE SEGURANÇA, SAÚDE, MEIO AMBIENTE E QUALIDADE - SASSMAQ. Disponível em: <<http://canais.abiquim.org.br/sassmaq/geral/intro.asp>>. Acesso 20 de setembro de 2024.

ADÁRIO, M. L. Utilização do processo fenton homogêneo no tratamento de efluentes gerados em cabines de pintura da indústria moveleira. Disponível em: <[https://www2.ufjf.br/engsanitariaeambiental//files/2014/02/TFC\\_Mariana-Lima-Ad%c3%a1rio.pdf](https://www2.ufjf.br/engsanitariaeambiental//files/2014/02/TFC_Mariana-Lima-Ad%c3%a1rio.pdf)>. Acesso em: 17 nov. 2024.

AQUINO, S. F. DE; SILVA, S. DE Q.; CHERNICHARO, C. A. L. Considerações práticas sobre o teste de demanda química de oxigênio (DQO) aplicado a análise de efluentes anaeróbios. Engenharia sanitária e ambiental, 2006.

ARAÚJO, A.L.P., COSSICH, E.S., TAVARES, C.R.G., “Remoção de DQO de efluente de indústria de celulose e papel empregando reagente Fenton”, *Scientia Plena*, v. 5, n. 7, jul. 2009.

ALJUBOURY, D. A. D. A.; PALANIANDY, P.; ABDUL AZIZ, H. B.; FERROZ, S. Treatment of petroleum wastewater by conventional and new technologies—a review. *Global Nest Journal*, v. 19, n. 3, p. 439-452, 2017.

BAUTISTA, P. MOHEDANO, A.F. CASAS, J. A. ZAZO, J. A. RODRIGUES, J.J. Review – An overview of the application of Fenton oxidation to industrial wastewaters treatment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology. Society of Chemical Industry*. 2008.

BRAILE, P.M.; CAVALCANTI, J.E.W. Manual de tratamento de águas residuárias industriais. 1ª edição. São Paulo. editora CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1993.

CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), Fundamentos do Controle de Poluição das Águas, 2018.

CODEBA, Autoridade Portuária. Infraestrutura. Disponível em: <[https://codeba.gov.br/eficiente/sites/portalcodesba/pt-br/porto\\_aratu.php?secao=porto\\_aratu\\_infraestrutura](https://codeba.gov.br/eficiente/sites/portalcodesba/pt-br/porto_aratu.php?secao=porto_aratu_infraestrutura)> Acesso em: 20 de outubro de 2024.

COELHO, A.D; CASTRO, A.V.S.; DEZOTTI, M.; SANT'ANNA, G.L. Tratamento das águas ácidas de refinaria de petróleo pelos processos Fenton e foto-Fenton combinados. XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

COHEN, M., et al. Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: Fundamentals and Applications. Wiley, 2016.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. O que é o CONAMA? Publicado em: 15 maio 2018. Disponível em: < <https://conama.mma.gov.br/o-que-e-o-conama>>. Acesso 19 de outubro de 2024.

CONAMA -Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2000. Resolução nº 357, 17 de Março de 2005. Ministério do Meio Ambiente.

CONAMA -Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2000. Resolução nº 430, 17 de Maio de 2011. Ministério do Meio Ambiente.

DALLAMUTA, João. Estudos Transdisciplinares nas Engenharias, Série II, 2019. Disponível em: <<https://atenaeditora.com.br/catalogo/ebook/estudos-transdisciplinares-nas-engenharias>>. Acesso em 23 de outubro de 2024.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e técnicas de tratamento de água. 2. ed. São Carlos: Ed. Rima, 2005. 1565 p.

EDZWALD, J. K.; HAARHOFF, J. Dissolved Air Flotation For Water Clarification. 1 edition ed. McGraw-Hill Education, 2011.

FERNANDES. RN, A. –. Materiais adsorventes e suas aplicações: uma revisão bibliográfica. 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/bccef72e-63c1-4545-bc00-8252e4a64348/content>>. Acesso em: 19 out. 2024.

FERREIRA, C. E. S. Avaliação da eficiência de um sistema de flotação por ar dissolvido para tratamento de águas residuárias de uma refinaria de petróleo. 2011 Disponível em: <[https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS9ASJ96/1/monografia\\_desa\\_christian.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS9ASJ96/1/monografia_desa_christian.pdf)>. Acesso em: 19 nov. 2024.

FONSECA, R.M; OLIVEIRA, D.S., OLIVEIRA,M.D. Protocolo para aplicação do processo Fenton no tratamento de efluente em uma indústria de laticínios. Vitória: IFES,2023.15 p.(PROTOCOLO).

FONSECA, R. R. Monitoramento e Controle Avançado Aplicados à Flotação por Ar Dissolvido. 2017. 159 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2017.

GARCÍA, J., et al. Hydrogen Peroxide as an Oxidizing Agent in Wastewater Treatment: A Review. Journal of Environmental Management, 2020.

GASPAR, Patrícia Martins Ferreira; PIVELI, Roque Passos; SOBRINHO, Pedro Além. Pós-tratamento de efluente de reator UASB em sistema de lodos ativados visando a remoção biológica do nitrogênio associada à remoção físico-química do fósforo. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2004.

GAUTO, M.A. & ROSA, G.R. Processos e operações unitárias da indústria química. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2011.

HENZE, M., et al. Wastewater Treatment: Biological and Chemical Processes. 2nd ed. Wiley, 2002.

HENZE, M.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M.; EKAMA, G. A.; BRDJANOVIC, D. Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design. London: <sup>1</sup> IWA Publishing, 2008

HIDRO SOLO. Tratamento de água. Disponível em: <https://hidrosolo.com.br/>. Acesso em: 30 out. 2024.

INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERAÇÃO PARA A AGRICULTURA – IICA; EMPRESA BAIANA DE ÁGUAS E SANEAMENTO S.A (EMBASA). Avaliação do aproveitamento do lodo das ETES no estado da Bahia. Disponível em: <https://cbsaneamento.com.br/case/avaliacao-do-aproveitamento-do-lodo-das-etes-no-estado-da-bahia/>.

JORDÃO, Eduardo P.; PESSÔA, Constantino A. Tratamento de esgotos domésticos. 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. 932 p.

KOVALTCHUK, G. E. Avaliação do sistema de flotação por ar dissolvido como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios : estudo de caso.2007. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/25824>>. Acesso em: 19 nov. 2024b.

LANGE, L. C.; ALVES, J. F.; AMARAL, M. C. S.; MELO, W. R. J. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processo oxidativo avançado empregando reagente de Fenton. Engenharia Sanitária e Ambiental, V. 11, N. 2, p. 175 – 183, abr/jun 2006.

LEE, M. M. H. Procedimento Operacional do Sistema de Limpeza Interna de Equipamentos que Transportam Produtos Químicos. Disponível em: <<https://engemausp.submissao.com.br/17/anais/arquivos/255.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2024.

LEMES JUNIOR, A. B., CHEROBIM, A. P., RIGO, C. M., Administração Financeira: princípios, fundamentos e práticas brasileiras. Rio de Janeiro: Elsevier, 2002.

LEMOS, Victória Cecília Moreira Nunes. Tratamento de Efluentes da Indústria de Sucos. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

LOURES, Carla Cristina Almeida. Estudo da Aplicação UV/Fenton (Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) no tratamento de Efluente de Laticínio. 2011. 229 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) –

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química na área de Novos Materiais e Química Fina, Universidade de São Paulo, Lorena, 2011.

LUCENA, Luis Medeiros de. Estudo do processo de adsorção com o carvão ativado proveniente do endocarpo de coco (*Coccus nucifera* L.) para remoção de cor, DQO e toxicidade de efluente têxtil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru, 2018.

METCALF and Eddy Inc. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MATTOS, I. L.; SHIRAIISHI, K. A. PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO: IMPORTÂNCIA E DETERMINAÇÃO. 2003 Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/pmvCvdFd9h5GtX5SBS4ZdgH/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 13 nov. 2024.

MORUZZI, R. B.; REALI, M. A. P. Método para Determinado de Distribuição de Tamanho de Microbolhas (DTMB) em Sistemas Flotação (FAD) para Tratamento de Águas Utilizando a Análise de Imagem Digital. Eng. sanit. ambient, São Paulo, SP, ano 2007, v. 12, n. 3, p. 273-283, 5 set. 2007.

MUSTAFA, George de Souza. Avaliação Econômica de Projetos Industriais. 1. ed. Salvador: UNIFACS, 2015.

PADILHA, Érika E, C. R. M. Marques, D. D. P. Campos, A. Tonetto, & A. R. Melo. (2021). Aplicações, F. E. Tratamento de Efluentes Industriais: Uma Revisão. In Revista Vincci - Periódico Científico do UniSATC, 6(1), 243–266. Disponível em: <<https://revistavincci.satc.edu.br/index.php/Revista-Vincci/article/view/233>>.

PELETEIRO, C. S. Dimensionamento, análise e comparação da viabilidade econômica de uma estação de tratamento de esgotos utilizando os processos de lodos ativados convencional e aeração prolongada. Disponível em: <<https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/17940/1/monopoli10009475.pdf>>. Acesso em: 6 nov. 2024.

QUEIROZ, M. T. A; FERNANDES, C. M; ALVIM, L. B; COSTA, T. C; AMORIM, C. C. Produção mais limpa: Fenton homogêneo no tratamento de efluentes têxteis. VIII Simpósio de excelência em gestão e tecnologia. 2011.

RODRIGUEZ, J., et al. "Biological Treatment of Saline Wastewater: A Review." Water Research, vol. 89, 2016, pp. 102-116.

RICHTER, C. A. Água: métodos e tecnologia de tratamento. 1. ed. São Paulo, SP: Blucher, 2009. 352 p. ISBN 978-85-212-0498-5.

SANTOS CMPC – Celulose riograndense, e. s. uso do sistema fenton para redução de carga orgânica do efluente hídrico de indústria de celulose. 2010 Disponível em:

<[https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/01\\_2010\\_Uso%20sistema%20Fenton.pdf](https://www.celso-foelkel.com.br/artigos/outros/01_2010_Uso%20sistema%20Fenton.pdf)>. Acesso em: 17 nov. 2024.

SANTOS, Leonardo Bandeira dos. Desenvolvimento de um flotor por ar dissolvido em coluna de estágios para tratamento de águas oleosas. 2018. 81 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Curso de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2018.

SANTOS, A. R. L. Caracterização e tratabilidade dos efluentes gerados em cabines de pintura de indústria moveleira. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de pós graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, 2008. Disponível :<<https://www.scielo.br/j/esa/a/dcXJd777WQrMQfQPczDbgLN/?lang=pt>>. Acesso: 15 nov.2024

SARMENTO, Antover Panazzolo. Uso do processo Fenton Modificado para a degradação de compostos orgânicos. 2013 Disponível: <<https://locus.ufv.br/server/api/core/bitstreams/88647d98-4636-47f6-8fdd-c25ac828ead0/content>>. Acesso : 03 out 2024

SECKLER, Sidney. Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento. Rio de Janeiro: GEN LTC, 2017.

SILVA,P.M.O.Estudo sistemático da precipitação seletiva de  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  utilizando  $\text{H}_2\text{s}$  gerado na hidrólise da tioacetamida para aplicação no tratamento de resíduos aquosos da indústria de galvanoplastia. 2012. Disponível em: <[https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/14968/1/2012\\_dis\\_pmosilva.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/14968/1/2012_dis_pmosilva.pdf)>. Acesso em: 19 nov. 2024.

SILVESTRE, Vinicius Fonseca. Concepção e dimensionamento de sistema de flotação por ar dissolvido em efluente de indústria têxtil. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Natal, RN, 2019.

SMITH, R. Chemical process design and integration. Chichester, West Sussex, England ; Hoboken, NJ: Wiley, 2005.

STEPHENSON, T. et al. Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment. Londres, England: IWA Publishing, 2000.

SOARES, Joceline Maria da Costa. Tratamento alternativo de efluentes de uma indústria de laticínios. 2018. 46 f. Dissertação (Mestrado em Conservação de Recursos Naturais do Cerrado) - Programa de Pós-Graduação em Conservação de Recursos Naturais do Cerrado, Instituto Federal Goiano, Urutaí, 2018.

SOUZA, K.R. Degradação Foto Fenton de Carbono Orgânico Total em efluentes da indústria de beneficiamento de castanha de caju. Dissertação de Mestrado –Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2005.

TOWLER, G. P.; SINNOTT, R. K. Chemical engineering design: principles, practice, and economics of plant and process design. 2nd ed ed. Boston, MA: Butterworth Heinemann, 2013.

VILLA, R.D.; SILVA, M.R.A.; NOGUEIRA, R.F.P. Potencial de Aplicação do Processo Foto-Fenton como pré-tratamento de efluente da indústria de laticínios. Química Nova, 2007.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 2005. 452 p., il. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1)

ZHANG, Y., et al. Rapid Degradation of Organic Pollutants Using Hydrogen Peroxide: Mechanisms and Applications. Water Research, 2017.

## APÊNDICE

Tabela 16 - Análise de valores pagos à CETREL durante 1 ano

<b>Período</b>	<b>Carga Analisada</b>	<b>Carga</b>	<b>Valor por carga (R\$)</b>	<b>Valor pago para a CETREL - (sem IOF) (R\$)</b>	<b>Valor pago para a DMCA</b>
<b>Jul/23</b>	Volume (m <sup>3</sup> )	1614,68	R\$ 3.358,53	R\$ 117,945,66	R\$ 132.403,76
	Materiais Suspensos (kg)	430,00	R\$ 3.3487,30		
	DBO (kg)	24658,69	R\$ 108.744,82		
	Óleos e graxas (kg)	157,00	R\$ 1.190,10		
<b>Ago/23</b>	Volume (m <sup>3</sup> )	1471,96	R\$ 3.061,68	R\$ 57.352,29	R\$ 120.700,72
	Materiais Suspensos (kg)	203,00	R\$ 1.646,33		
	DBO (kg)	11.566,73	R\$ 51.009,28		
	Óleos e graxas (kg)	109,00	R\$ 1.635,00		
<b>Set/23</b>	Volume (m <sup>3</sup> )	720,90	R\$ 1.499,47	R\$ 44.177,75	R\$ 59.113,80
	Materiais Suspensos (kg)	219,17	R\$ 1.777,47		
	DBO (kg)	8825,58	R\$ 38.920,81		
	Óleos e graxas (kg)	132,00	R\$ 1.980,00		
<b>Out/23</b>	Volume (m <sup>3</sup> )	663,38	R\$ 1.379,83	R\$ 42.495,15	R\$ 54.397,16
	Materiais Suspensos (kg)	224,40	R\$ 1.819,88		
	DBO (kg)	8563,59	R\$ 37.765,43		
	Óleos e graxas (kg)	102,00	R\$ 1530,00		
<b>Nov/23</b>	Volume (m <sup>3</sup> )	572,21	R\$ 1.190,20	R\$ 54.888,47	R\$ 46.921,22
	Materiais Suspensos (kg)	337,55	R\$ 2.737,53		
	DBO (kg)	10.311,03	R\$ 45.471,64		
	Óleos e graxas (kg)	365,94	R\$ 5489,10		
<b>Dez/24</b>	Volume (m <sup>3</sup> )	493,98	R\$ 1.027,48	R\$ 73.438,59	R\$ 40.506,36
	Materiais Suspensos (kg)	596,23	R\$ 4.835,43		
	DBO (kg)	14.784,51	R\$ 65.199,69		

Tabela 16 - Análise de valores pagos à CETREL durante 1 ano

<b>Período</b>	<b>Carga Analisada</b>	<b>Carga</b>	<b>Valor por carga (R\$)</b>	<b>Valor pago para a CETREL - (sem IOF) (R\$)</b>	<b>Valor pago para a DMCA</b>
<b>Jan/24</b>	Óleos e graxas (kg)	158,40	R\$ 2.376,00	R\$ 53.954,23	R\$ 76.706,08
	Volume (m³)	935,44	R\$ 1.945,72		
	Materiais Suspensos (kg)	305,00	R\$ 2.473,55		
	DBO (kg)	10.936,50	R\$ 48.229,97		
<b>Fev/24</b>	Óleos e graxas (kg)	87,00	R\$ 305,00	R\$38.842,67	R\$ 55.056,44
	Volume (m³)	671,42	R\$ 1396,55		
	Materiais Suspensos (kg)	297,00	R\$ 2408,67		
	DBO (kg)	7710,17	R\$ 34001,85		
<b>Mar/24</b>	Óleos e graxas (kg)	69,04	R\$ 1035,60	R\$ 33.744,47	R\$ 103.881,70
	Volume (m³)	1266,85	R\$ 2635,05		
	Materiais Suspensos (kg)	321,75	R\$ 2609,39		
	DBO (kg)	6269,02	R\$ 27.646,38		
<b>Abr/24</b>	Óleos e graxas (kg)	56,91	R\$ 853,65	R\$ 46.369,04	R\$ 108.212,12
	Volume (m³)	1319,66	R\$ 2744,89		
	Materiais Suspensos (kg)	256,38	R\$2079,24		
	DBO (kg)	8849,73	R\$39027,31		
<b>Mai/24</b>	Óleos e graxas (kg)	167,84	R\$ 2.517,60	R\$ 24.754,26	R\$ 126.598,16
	Volume (m³)	1543,88	R\$ 3.211,27		
	Materiais Suspensos (kg)	259,00	R\$ 2.100,49		
	DBO (kg)	3990,26	R\$17.597,05		
<b>Jun/24</b>	Óleos e graxas (kg)	123,03	R\$ 1.845,45	R\$ 27.236,27	R\$ 125.157,42
	Volume (m³)	1526,31	R\$ 3.174,72		
	Materiais Suspensos (kg)	150	R\$ 1.216,50		
	DBO (kg)	4935,01	R\$ 21.763,39		
	Óleos e graxas (kg)	72,11	R\$ 1.081,65		

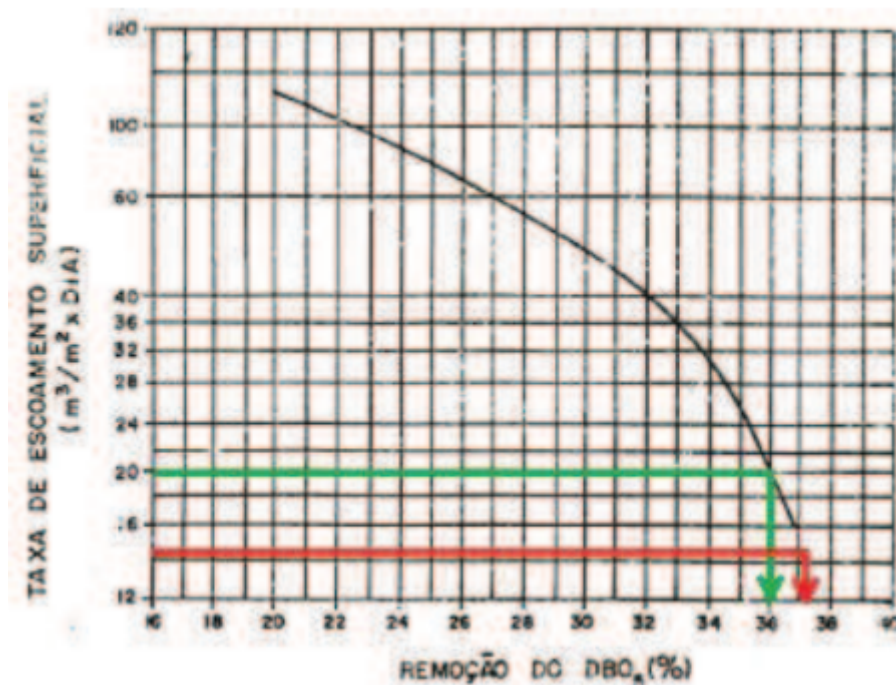
Tabela 16 - Análise de valores pagos à CETREL durante 1 ano

<b>Período</b>	<b>Carga Analisada</b>	<b>Carga</b>	<b>Valor por carga (R\$)</b>	<b>Valor pago para a CETREL - (sem IOF) (R\$)</b>	<b>Valor pago para a DMCA</b>
<b>Jul/24</b>	Volume (m <sup>3</sup> )	1501,67	R\$ 3.165,52		
	Materiais Suspensos (kg)	311,20	R\$2.558,06	R\$ 34.696,46	R\$ 123.136,94
	DBO (kg)	6190,91	R\$ 27.673,37		
	Óleos e graxas (kg)	85,24	R\$ 1.296,50		

Fonte: Autoria própria, 2024.

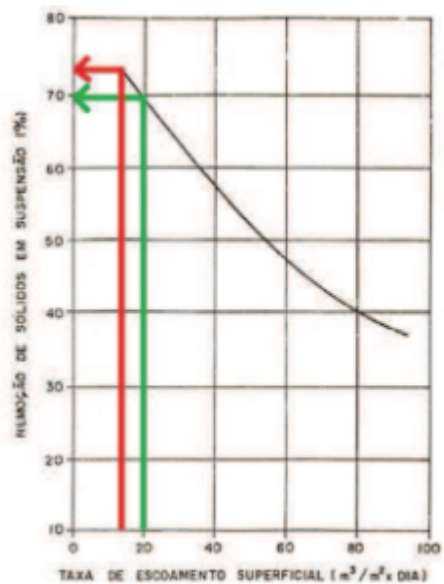
## ANEXOS

Figura 8 - Taxa de escoamento superficial x Remoção do DBO(%)



Fonte: NBR NB 570, 1990.

Figura 9 - Remoção de sólidos em suspensão x taxa de escoamento superficial



Fonte: NBR NB 570, 1990.

Figura 10 - Constantes da lei de Henry para o ar

Temp. (°C)	(mg/L)/atm	(mg/L)/kPa	(mg/L)/(kg/cm <sup>2</sup> )	(mg/L)/mca
0	37,3	0,405	36,1	3,61
5	32,7	0,330	31,7	3,17
10	29,3	0,293	28,4	2,84
15	26,9	0,272	26,0	2,60
20	24,3	0,239	23,5	2,35
25	21,7	0,219	21,0	2,10
30	20,9	0,202	20,2	2,02

\* A densidade do ar seco a 0 °C e 1 atm é 1.293,8 mg/L.

Fonte: Richter, 2009.

Figura 13 - Densidade do ar saturado a diversas temperaturas

Temperatura (°C)	0	5	10	15	20	25	30	35
$\rho_{\text{sat}}$ (mg/L)	1.207	1.263	1.237	1.211	1.187	1.161	1.133	1.106

Fonte: Richter, 2009.