



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

HENRIQUE NUNES FERNANDES

**PROJETO DE UM REATOR DE ELETROCOAGULAÇÃO EM ESCALA DE
BANCADA PARA ESTUDOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTE**

Recife

2021

HENRIQUE NUNES FERNANDES

**PROJETO DE UM REATOR DE ELETROCOAGULAÇÃO EM ESCALA DE
BANCADA PARA ESTUDOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal, Centro de Tecnologia e Geociências,
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Profa. Dra. Janaina Moreira de Meneses.

Recife

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Fernandes, Henrique Nunes.

Projeto de um reator de eletrocoagulação em escala de bancada para estudos de tratamento de efluente / Henrique Nunes Fernandes. - Recife, 2021.

41 : il., tab.

Orientador(a): Janaina Moreira de Meneses

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Mecânica - Bacharelado, 2021.

Inclui referências, apêndices.

1. Eletrocoagulação. 2. Projeto de reator. 3. Desenvolvimento de produto. I. Meneses, Janaina Moreira de. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)



Universidade Federal de Pernambuco
Departamento de Engenharia Mecânica Centro de
Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC2

Aos 21 dias do mês de dezembro do ano de dois mil e vinte e um, às 14:00 horas, de forma virtual através da plataforma google meet, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **PROJETO DE UM REATOR DE ELETROCOAGULAÇÃO EM ESCALA DE BANCADA PARA ESTUDOS DE TRATAMENTO DE EFLUENTE**, elaborado pelo aluno **Henrique Nunes Fernandes**, matrícula 07987282480, composta pelos professores **Janaina Moreira de Meneses** (orientador), **Justo Emilio Avarez Jacobo** (membro titular) e **Jorge Antônio Palma Carrasco** (membro titular). Após a exposição oral, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se e deliberaram pela aprovação do candidato, atribuindo-lhe a média 9,5 julgando-o apto à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Prof(a): Prof. **Janaina Moreira de Meneses** Nota: 9,5
Orientador(a):

Assinatura

Prof(a)/Membro: Prof. **Justo Emelio Avarez Jacobo** Nota: 9,5

Assinatura

Prof(a)/Membro: Prof. **Jorge Antônio Palma Carrasco** Nota: 9,5

Assinatura

Recife, 21 de Dezembro de 2021.

Prof. Pedro Manuel González del Foyo
Coordenador de Trabalho de Conclusão de Curso -TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

Dedico esse trabalho a minha mãe Maria, que a todo momento acreditou no meu potencial, e não mediu esforços e recursos para eu conquistasse o meu diploma.

AGRADECIMENTOS

Cada dia passado desde a aprovação no vestibular, foi de extrema importância para meu amadurecimento pessoal, acadêmica e profissional. Nos últimos anos, obtive conquistas das quais me orgulho e partilho com todos que me acompanharam diretamente e indiretamente. No entanto, há algumas pessoas que eu não poderia deixar de mencioná-las e expressar minha enorme gratidão por marcarem a minha trajetória.

Primeiramente agradeço a Deus, por proporcionar mais essa conquista, minha eterna gratidão.

A minha família, em especial para minha mãe Maria, pela compreensão, incentivo, paciência, ajuda e carinho destinados a mim. A minha irmã Jéssica, a qual carinhosamente chamo de Del, que sempre me recebia de braços abertos quando eu retornava para casa nas férias, e que me ligava para dizer o quanto eu fazia falta em casa. O meu tio Valmir, ao meu pai Eufrásio e as minhas tias Verônica e Valdenice, por sempre me apoiarem. Vocês são bastante importantes para a minha vida. Sou muito feliz ao lado de vocês.

A professora Dra. Janaina Meneses, pela orientação deste trabalho, receba minha sincera gratidão por me auxiliar e acompanhar nesta etapa importante da minha vida.

Por fim, ao casal Ana Cristina e Seu Jorge que me receberam no seu pensionato como um filho. E aos meus amigos de Cabrobó e da faculdade. Gratidão pelo companheirismo e amizade.

RESUMO

A preservação de recursos naturais, principalmente, recursos hídricos é um dos maiores desafios do século XXI. Desafios estes ligados ao crescimento populacional, desmatamento, rápida urbanização, industrialização e mudanças climáticas. A poluição da água pode impactar gravemente os ecossistemas aquáticos, causando desabastecimento e disponibilidade de água potável, já que o acesso a água potável é limitado. De modo, faz-se necessário o desenvolvimento de métodos, tecnologias e abordagens eficientes para a gestão e tratamento de águas residuais, gerando sustentabilidade e proteção ambiental. O método de eletrocoagulação é um dos mais promissores e amplamente empregado para tratar diversos efluentes das indústrias, sendo assim, visando o emprego de tecnologias e métodos para o tratamento de resíduos e águas residuais, este trabalho, propôs a descrição de um projeto de construção de um reator eletroquímico do tipo batelada para o tratamento de efluentes residuais em escala de bancada para a utilização do método de eletrocoagulação. Para o projeto do equipamento, foram utilizados método de gestão e desenvolvimento de produto e ferramenta de modelagem tridimensional, gerando ao final, um modelo conceitual de reator e a ficha de desenho técnico dos componentes do mesmo. O reator, objetiva também a didática do processo de tratamento de efluentes, onde a comunidade pode acompanhar visualmente o funcionamento, e permitirá abranger futuros temas de conclusões de curso e pesquisas científicas dentro da UFPE, tanto para a mecânica (melhoramento estrutural contínuo do reator), quando para química (estudos de análise de efluentes de diferentes setores da indústria).

Palavras-chave: Eletrocoagulação. Projeto de reator. Desenvolvimento de produto.

ABSTRACT

The preservation of natural resources, especially water resources, is one of the greatest challenges of the 21st century. These challenges are linked to population growth, deforestation, rapid urbanization, industrialization and climate change. Water pollution can severely impact aquatic ecosystems, causing shortages and availability of fresh water, as access to fresh water is limited. Thus, it is necessary to develop efficient methods, technologies and approaches for the management and treatment of wastewater, generating sustainability and environmental protection. The electrocoagulation method is one of the most promising and widely used to treat various industrial effluents. Therefore, aiming at the use of technologies and methods for the treatment of waste and wastewater, this work proposed the description of a construction project for a batch-type electrochemical reactor for the treatment of wastewater on a bench scale using the electrocoagulation method. For the equipment project, a product management and development method and a three-dimensional modeling tool were used, generating, in the end, a conceptual reactor model and a technical drawing sheet of its components. The reactor also aims at teaching the effluent treatment process, where the community can visually monitor the operation, and will allow covering future topics of course conclusions and scientific research within UFPE, both for mechanics (continuous structural improvement of the reactor) , when for chemistry (studies of analysis of effluents from different sectors of the industry).

Keywords: Electrocoagulation. Reactor design. Product development.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Interações observadas durante o processo de eletrocoagulação	13
Figura 2 – Fases do desenvolvimento de produtos	21
Figura 3 – Divisão dos níveis e etapas do projeto	22
Figura 4 – Primeiro nível do projeto: Planejamento do produto	23
Figura 5 – Experimento utilizando um reator de eletrocoagulação	24
Figura 6 – Segundo nível do projeto: Projeto do produto	25
Figura 7 – Carcaça do reator	26
Figura 8 – Hélice de agitação	27
Figura 9 – Suporte do motor	28
Figura 10 – Suporte dos eletrodos	29
Figura 11 – Placa de eletrdo	29
Figura 12 – Projeto conceitual do reator de eletrocoagulação	31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Lista de materiais	30
-----------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produtos
CAD	<i>Computer Aided Design</i> - Desenho Assistido por Computador
EC	Eletrocoagulação
EAS	Engenharia Ambiental e Sanitária
CQAs	Compostos Quartenários de Amônio
pH	Potencial Hidrogeniônico
DQO	Demanda Química de Oxigênio
COT	Carbono Orgânico Total
TSS	Totais de Sólidos em Suspensão
Ntotal	Nitrogênio Total
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
APC	<i>Alternating Pulse Current</i> - Corrente de Pulso Alternado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo geral	12
1.1.2	Objetivos específicos	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1	FUNDAMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA	13
2.2	EFLUENTES DA INDÚSTRIA SANEANTE	15
2.3	TIPOS DE REATORES DE ELETROCOAGULAÇÃO	16
2.3.1	Modo Batelada	16
2.3.2	Modo Contínuo	16
2.4	APLICAÇÃO DE ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES	16
2.5	PARÂMETROS ASSOCIADOS AO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO	18
2.5.1	Material do eletrodo	18
2.5.2	Distância entre os eletrodos	18
2.5.3	Densidade de corrente	18
2.5.4	Efeito do pH inicial	19
2.5.5	Tipo de fonte de alimentação	19
2.5.6	Efeito da velocidade de agitação magnética	20
2.5.7	Efeito do suporte eletrolítico	20
2.5.8	Tempo de eletrólise	20
2.5.9	Efeito da temperatura inicial	20
2.6	DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO	21
3	METODOLOGIA	22
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	26
4.1	CARCAÇA DO REATOR	26
4.2	MECANISMO DE AGITAÇÃO	27
4.3	SUPORTE DOS ELETRODOS	28
4.4	PROJETO CONCEITUAL DO REATOR	30
5	CONCLUSÕES	32
5.1	RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS	32

REFERÊNCIAS	33
APÊNDICE A – FICHA DE DESENHO TÉCNICO DOS COMPONENTES DO REATOR	37

1 INTRODUÇÃO

O estudo da Engenharia Ambiental e Sanitária (EAS) desempenha um papel célebre na vida das sociedades modernas. Tendo como responsabilidade principal o desenvolvimento de práticas de prevenção a evitar liberação de substâncias contaminantes no ambiente, visando proteger o ser humano e o ambiente dos efeitos adversos da poluição aplicando políticas de descarte de resíduos sólidos, estratégias de reciclagem, bem como controle de poluição de água, solo e ar. Agregado com a subárea Gestão de Efluentes e Resíduos Industriais visa gerenciar a aplicação de tecnologias apropriadas e ecológicas no tratamento de efluentes e resíduos sólidos objetivando a mitigação dos impactos negativos a saúde humana e ambiental (POZNYAK; CHAIREZ; POZNYAK, 2019).

A preservação de recursos naturais, principalmente, recursos hídricos é um dos maiores desafios do século XXI. Desafios estes ligados ao crescimento populacional, desmatamento, rápida urbanização, industrialização e mudanças climáticas. A poluição da água pode impactar gravemente os ecossistemas aquáticos, causando desabastecimento e disponibilidade de água potável, já que o acesso a água potável é limitado. Portanto, faz-se necessário o desenvolvimento de métodos, tecnologias e abordagens eficientes para a gestão e tratamento de águas residuais, gerando sustentabilidade e proteção ambiental (HAKIZIMANA et al., 2017).

O tratamento de águas residuais é de extrema importância para a mitigação dos impactos negativos causado pelo descarte inadequado de substâncias contaminantes. Assim, a utilização de tecnologias e métodos convenientes e sustentáveis carecem de ser agregados a evitar, prevenir e tratar problemas associados a efluentes e resíduos sólidos proveniente das ações humanas (HAKIZIMANA et al., 2017; TAHREEN; JAMI; ALI, 2020).

O aparecimento de substâncias mais complexas usadas no cotidiano aumentou a presença de misturas de contaminantes mais complexas em água residual, solos contaminados e na atmosfera (CHENG, 2017). Anualmente, a fração de $\frac{1}{4}$ dos Compostos Quartenários de Amônio - CQAs utilizados são despejados diretamente no meio ambiente. Como consequência, os microrganismos são sujeitados aos CQAs dinamicamente em uma abrangente faixa de concentrações, ou seja, concentrações não inibitórias, subinibitórias e superinibitórias, já que em condições aeróbicas e em baixas concentrações os CQAs são biodegradáveis, suas concentrações flutuam constantemente em ambiente internos e externos levando a serem resistentes (GERBA, 2014).

O método de eletrocoagulação é um dos mais promissores e amplamente empregado para tratar diversos efluentes das indústrias agropecuária, petróleo, metalúrgica, têxtil, farmacêutica, saneante e etc, como por exemplo, efluentes de abatedouros de aves (COMBATT et al., 2017; RUFATO, 2018), lixiviados de aterro sanitário (NIZA et al., 2020), efluente de lavanderias (DIMOGLO et al., 2019), refino de petróleo (EL-NAAS et al., 2009), bem como pode ser

utilizado para tratar efluentes de indústria farmacêutica (FARHADI et al., 2012; PADMAJA; CHERUKURI; REDDY, 2020). Desta forma, esta técnica é também utilizada no tratamento de água, pois, inclui os benefícios da coagulação, flotação e da eletroquímica (MOUSSA et al., 2017; BABU et al., 2019). A EC surge então como um tratamento ecológico visto que não requer aditivos químicos adicionais e apresenta mínima geração de lodo (ASWATHY et al., 2016).

Visando o emprego de tecnologias e métodos para o tratamento de resíduos e águas residuais, a proposta deste trabalho objetiva a construção de um reator eletroquímico do tipo batelada em escala de bancada para o estudo de tratamento de efluentes residuais por eletrocoagulação. Assim, o reator será projetado baseando-se em projetos de reatores já divulgados, esforçando-se em sanar problemas associados ao processo, como por exemplo, o escoamento da espuma contaminada que se forma, o sistema de agitação do efluente durante o processo e o espaçamento entre os eletrodos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é descrever a geometria tridimensional de um reator eletroquímico do tipo batelada em escala de bancada para o tratamento de efluentes.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta proposta são:

1. Propor o mecanismo de escoamento da espuma;
2. Propor um mecanismo de agitação do efluente;
3. Projetar um suporte para a sustentação dos eletrodos;
4. Detalhar a geometria do reator

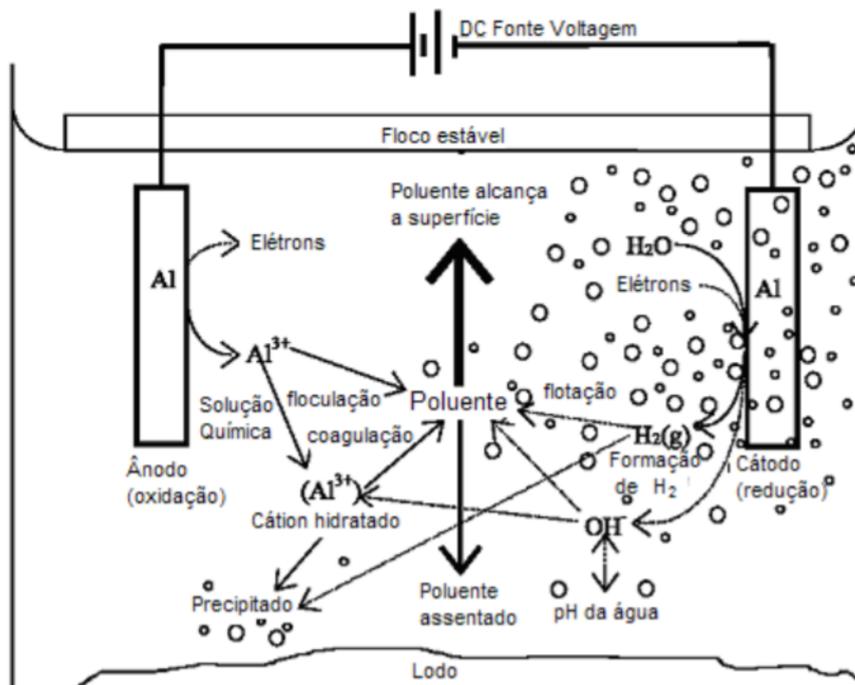
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 FUNDAMENTAÇÃO DA TECNOLOGIA

A eletrocoagulação é uma tecnologia avançada que combina as técnicas de coagulação, eletroquímica e flotação. Uma unidade simples de eletrocoagulação geralmente consiste em uma célula eletrolítica com um ânodo e um cátodo de metal imersos na solução a ser tratada, que são conectados externamente a uma fonte de alimentação de corrente contínua CC. Os eletrodos de alumínio e ferro são os mais usados para as células de eletrocoagulação, pois possuem grande disponibilidade, não são tóxicos e são comprovadamente confiáveis (MOUSSA et al., 2017).

A eletrocoagulação envolve a geração de coagulantes *in situ* pela dissolução eletrolítica de íons metálicos a partir do eletrodo. Ao se aplicar um potencial, o ânodo irá oxidar (gerando os íons metálicos) e o cátodo irá reduzir (formação de gás hidrogênio). Neste processo, utilizando o alumínio como ânodo de sacrifício, a partir da aplicação do potencial elétrico são gerados no ânodo os íons Al^{3+} que são eficientes coagulantes para a floculação de partículas, sofrerão reações, os íons alumínio hidrolizados podem formar vários complexos de $Al - O - Al - OH$ que podem quimicamente adsorver poluentes, como ilustrado na Figura 1 (CHEN, 2017).

Figura 1 – Interações observadas durante o processo de eletrocoagulação.



Fonte: (HENRIQUES, 2004)

As reações que ocorrem no ânodo são: a oxidação do alumínio (1):



Os íons de alumínio reagem com os íons de hidroxila, formando o agente coagulante, hidróxido de alumínio, composto responsável por remover as impurezas do efluente, em condições ácidas (2):



E, em condições alcalinas:



Outros complexos de alumínio são formados pelas reações espontâneas citadas anteriormente e observadas na reação (3):



Além da formação do agente coagulante, o processo de eletrocoagulação gera micro bolhas de gases, que ao serem liberados nos eletrodos podem colidir e causar a flutuação dos materiais coagulados (MOUSSA et al., 2017).

A eletrólise da água também ocorre no ânodo, com evolução do oxigênio, observada na reação (4):



E a evolução do hidrogênio ocorre em reações catódicas, observada na reação (5):



O número de bolhas de hidrogênio que é formado está relacionado com a corrente aplicada, sendo que quando uma corrente menor é aplicada, um número menor de bolhas é formado, favorecendo a sedimentação, e quando aplicado uma corrente maior, a mesma favorece um número de bolhas maior

Mollah et al. (2004) descreve o processo de eletrocoagulação envolvendo três sucessivos estágios: (a) formação dos coagulantes pela oxidação eletrolítica do eletrodo de sacrifício; (b) desestabilização dos contaminantes, suspensão da partícula e quebra da emulsão; (c) agregação das fases desestabilizadas para formação de flocos.

Tais reações físico-químicas podem tomar lugar na célula de eletrocoagulação (MOLLAH et al., 2004):

- Redução catódica das impurezas presentes no efluente;
- Descarga e coagulação das partículas coloidais;

- Migração eletroforética dos íons na solução;
- Eletroflotação das partículas coaguladas pelas bolhas de O_2 e H_2 produzidas nos eletrodos;
- Redução dos íons metálicos no cátodo;
- Outros processos químicos e eletroquímico.

O processo de eletrocoagulação está intrinsecamente associado com a eletroflotação desde que bolhas de hidrogênio e oxigênio sejam produzidas no ânodo e no cátodo, respectivamente. O sucesso do processo da eletrocoagulação, e a importância da eletroflotação são determinados pelo tamanho das bolhas assim como a mistura adequada das bolhas com o efluente. Pequenas bolhas fornecem mais área de superfície para o contato das partículas no meio aquoso, resultando numa melhor eficiência de separação no processo de eletroflotação (CHEN, 2017).

2.2 EFLUENTES DA INDÚSTRIA SANEANTE

Produtos saneantes são substâncias ou preparações destinadas à higienização e desinfecção de ambientes domiciliares, coletivos e/ou públicos. Quanto a finalidade de emprego destes produtos tem-se: os de limpeza em geral, com ação antimicrobiana e desinfetantes (ANVISA, 2001)

Dentre os produtos saneantes, os produtos desinfetantes de uso geral são destinados exclusivamente a sanitização e desinfecção de pisos, paredes e outras superfícies, com a finalidade de destruir indiscriminadamente ou seletivamente microrganismos. A formulação desses produtos é geralmente composta por água, componente ativo (parte orgânica - surfactantes) e componente aditivo (inorgânico). Dentre o grupo dos surfactantes tem-se os catiônicos, que são principalmente os sais de aminas primárias, secundárias ou terciárias e os compostos quaternários de amônio (MENEZES, 2005).

As atividades antrópicas, decorrente de descargas de efluente doméstico que contém grande concentração de produtos saneantes, bem como o descarte irregular de efluentes industriais oriundo dos processos de produção que utilizam os compostos quaternários de amônio causam sérios danos ao meio ambiente. O efluente da indústria de saneantes é caracterizado pela presença de moléculas orgânicas, o que torna o efluente muito complexo, com diferentes características e altas concentrações de Demanda Química de Oxigênio-DQO (PINHEIRO, 2014).

Além disso, as estações de tratamento de esgotos e estações de tratamento de efluentes industriais típicas removem apenas os principais compostos biodegradáveis, e alguns contaminantes menores (micropoluentes) como os sais quaternários de amônio, não são removidos completamente e podem ser lançados no meio ambiente (TEZEL; PAVLOSTATHIS, 2015). Nos compostos quaternários de amônio a presença da cadeia hidrofóbica e dos átomos de nitrogênio com carga positiva facilita a adsorção desses compostos em sedimentos e lodo (LI et al., 2014).

A diluição ambiental e a biodegradação dos CQAs geralmente criam ambientes com baixas concentrações destes, e em concentrações subinibitórias, a resistência ao CQA surge principalmente como resposta bacteriana ao estresse oxidativo induzido e frequentemente causando mutações, levando à evolução e seleção de bactérias resistentes a CQAs (TEZEL; PAVLOS-TATHIS, 2015).

2.3 TIPOS DE REATORES DE ELETROCOAGULAÇÃO

Reatores eletroquímicos são equipamentos de transformação forçada de material pela corrente elétrica operando nos regimes contínuo ou batelada. A redução sucede no cátodo e a oxidação ocorre no ânodo (MUDDMANN; HAUPT; SIEVERS, 2019).

Nota-se na literatura que a EC tem sido explorada para o tratamento de efluentes objetivando a remoção de uma ampla gama de poluentes utilizando os modos de operação batelada e modo contínuo (KHANDERGAR; SAROHA, 2013).

2.3.1 Modo Batelada

São reatores funcionam em regime fechado, ou seja, sem entrada ou saída de matéria durante o ciclo de tratamento e assim, as condições dentro do reator alteram-se em função do tempo (PERTILE, 2014). Os reatores em batelada permitem estudar uma variedade de condições operacionais e são mais empregados para atividades acadêmicas (KHANDERGAR; SAROHA, 2013).

2.3.2 Modo Contínuo

Os reatores contínuos operam em regime estacionário, ou seja, continuamente há um fluxo de matéria entrando e saindo do reator enquanto acontece a reação em seu interior. Tendo parâmetros operacionais como tempo, temperatura, velocidade de mistura do processo, e comportamento de reagentes constantes (PERTILE, 2014). A natureza permanente dos reatores em fluxo contínuo permitem tratamentos de grandes volumes de efluentes e sendo adequados para aplicações industriais (KHANDERGAR; SAROHA, 2013).

2.4 APLICAÇÃO DE ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

O método de eletrocoagulação vem sendo aplicado com êxito para tratar uma diversidade de águas residuais oriundos de processos industriais, tais como águas residuais de lavanderias, matadouros, fábricas de fertilizantes orgânicos, das indústrias têxtil, de laticínios e metalúrgica, na remoção de metais, partículas suspensas, coloides, óleos e graxas (KOBAYA; DEMIRBAS, 2015)

Exemplificando o emprego do método, Modenes et al. (2017) tratou efluentes da indústria frigorífica de abatedouro de aves localizada em Palotina-PR com 6 eletrodos de ferro em

configuração colmeia igualmente espaçados de 1 cm, e área útil de 672 cm² em um reator tipo batelada. Tal aplicação obteve os parâmetros ótimos do processo, como o pH inicial 8, tempo de eletrólise 50 min, e intensidade de corrente 2 A, resultando em uma remoção de turbidez, cor e DQO de 99,16%, 99,63%, e 92,00%, nesta ordem. Nota-se que os valores obtidos para os parâmetros cor e turbidez, após o processo de EC, encontram-se abaixo dos valores padrões estipulados para lançamentos de efluentes em corpos de receptores classe III, de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005.

Ampliando a área de utilidade do método, Souza (2016) em sua tese efetuou o tratamento de efluentes da indústria têxtil localizada na região Campo Mourão-PR, utilizando um reator tipo batelada com um conjunto de 6 placas de íon de ferro e alumínio com área efetiva de 660 cm². As condições ótimas dos parâmetros operacionais foram obtidas com o auxílio de análise estatística, obtendo-se modelos de 2º ordem o qual acarretou em melhores condições de funcionamento com pH inicial 6,0, intensidade corrente 3 A, e espaçamento de eletrodos 20 mm, resultando em uma remoção de 79,13%, 97,48%, e 91,67% de DQO, turbidez, e cor, respectivamente, com um tempo de eletrólise de 60 min. Adicionalmente, verificou-se que os melhores resultados foram gerados com espaçamentos menores entre os eletrodos e com maiores intensidades de correntes para a redução do DQO. Experimentos complementares realizados com pH inicial 6, corrente 5,0 A, espaçamento de 10 mm, e tempo de eletrólise variando entre 15 min a 120 min, resultaram em uma redução expressiva de aproximadamente 50% de DQO em 30 min, alcançando o máximo em torno de 60 min com aproximadamente 65%, somado com a remoção de COT (Carbono Orgânico Total) que após os primeiros 30 min abrangeu a faixa de 40% a 50%. Quanto a turbidez e cor, acima de 90% de redução a contar de 100 min, e a partir de 75 min acima de 95% de redução, respectivamente.

Ceni (2017) elaborou um estudo de aplicação comparando os métodos de coagulação química tradicional e de eletrocoagulação (modo batelada e contínuo) no tratamento de efluentes da indústria de laticínios associado com peróxido de hidrogênio utilizando eletrodos de ferro. O método tradicional utiliza o cloreto férrico (10%) como agente coagulante em uma faixa de concentração entre 400 mg.L⁻¹ a 700 mg.L⁻¹, todas as demais condições analisadas apresentaram uma boa eficiência de remoção para os parâmetros acompanhados, com remoções superiores a 97% para cor e turbidez, 83%, 78% e 70% para Ntotal (Nitrogênio Total), DQO, e COT, nesta ordem. Já o método EC em modo batelada, os resultados de remoção para DQO, turbidez, cor, COT, e Ntotal foram de 97,8%, 99,6%, 99,7%, 73,0%, e 92,3%, respectivamente, com a melhor condição de operação, sendo intensidade de corrente 2 A, espaçamento 2 cm, obtendo tempo de eletrólise 10 min. Para o método EC em modo contínuo em condições de operação com espaçamento de 2 cm, pH 7, potencial elétrico de 10 V, tempo de residência hidráulica 30 min, e condutividade 2000 µ.S incorporado com o peróxido de hidrogênio, verificou-se uma melhora na eficiência de remoção para todas as respostas avaliadas, com destaque para a remoção de DQO e COT, atingindo valores máximo de 96,6% e 86,5%, respectivamente.

Em conclusão, o método EC é uma alternativa economicamente viável por não utilizar agentes coagulantes em comparação ao método tradicional, e por atender as exigências da legislação ambiental vigente, representando um solução acessível a sustentabilidade hídrica.

2.5 PARÂMETROS ASSOCIADOS AO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO

A seguir, são descritas as condições operacionais necessárias em um processo de eletrocoagulação para obter resultados eficientes. Para que isso seja alcançado, certos parâmetros precisam ser otimizados. O uso desses parâmetros ótimos pode levar simultaneamente a uma remoção eficiente de efluentes em um tempo operacional relativamente curto com os menores custos e consumo de energia possíveis (BRAHMAI et al., 2018). Observa-se que existem vários tipos de parâmetros pesquisados por vários autores, mas entre eles existem alguns que afetam fortemente o processo de EC, conforme afirma (KRYSTINIK; TITO, 2017).

2.5.1 Material do eletrodo

A escolha do material do eletrodo é um dos parâmetros de controle da EC que influencia no desempenho e eficiência do processo, é também está associada ao custo. Geralmente, eletrodos de alumínio e ferro são usados por causa das propriedades de coagulação de íons multivalentes. Adicionalmente, outra característica é que os sais de alumínio e cloreto de ferro são os coagulantes mais usados e os mais convencionalmente aceitos no tratamento de água residuais devido a sua fácil disponibilidade, seu baixo custo e suas altas taxas de eletrodissolução (GARCIA-SEGURA et al., 2017).

2.5.2 Distância entre os eletrodos

Quando o efluente tem uma alta condutividade elétrica e uma densidade de corrente constante o espaçamento entre os eletrodos deve aumentar para reduzir o consumo de energia. Por outro lado, quando o efluente tem uma condutividade elétrica baixa, a distância entre os eletrodos deve ser reduzida para diminuir o consumo de energia (DARBAN et al., 2020).

2.5.3 Densidade de corrente

A densidade de corrente é um dos parâmetros mais importantes quando se trata do processo de EC. É a corrente por área do eletrodo que determina a quantidade de íons metálicos que os eletrodos liberam e pode ser controlada diretamente para determinar a taxa das reações eletroquímicas (MOUSSA et al., 2017). A fim de determinar a densidade de corrente ideal, vários testes de EC precisam ser feitos (conhecendo a área de superfície dos eletrodos), variando a corrente entre 5 A a 25 A (ZAZOULI; TAGHAVI, 2012), tudo isso mantendo os demais parâmetros operacionais ou condições constantes (MOUSSA et al., 2017). Se for utilizada uma corrente de amperagem muito elevada, a possibilidade de aumento do consumo de energia, no

aquecimento da água, é alta e uma diminuição na eficiência da corrente é inevitável (ZAZOULI; TAGHAVI, 2012; MOUSSA et al., 2017).

Parâmetros como pH, taxa de fluxo de água e temperatura podem afetar a eficiência da densidade de corrente (KHANDERGAR; SAROHA, 2013).

2.5.4 Efeito do pH inicial

O pH é um parâmetro operacional crítico (NAJE et al., 2016). O pH da solução de reação muda durante o processo de eletrocoagulação, e o pH final do efluente realmente afeta o desempenho geral do tratamento (KABDAŞLI et al., 2012). Também afeta a condutividade da solução, aumentando ou diminuindo a eficiência do processo de EC (VEPSÄLÄINEN; PULLIAINEN; SILLANPÄÄ, 2012; MANSOORIAN; MAHVI; JAFARI, 2014; GATSIOS; HAHLADAKIS; GIDARAKOS, 2015). Outras observações sobre o pH inicial da solução são tais que quando é altamente ácido ($\text{pH} < 3$) ou altamente alcalino ($\text{pH} > 11$) não há muita mudança, mas quando o pH inicial é ácido, ele aumentará em toda a EC e diminuirá quando é alcalino (MOUSSA et al., 2017). Assim como todos os outros parâmetros, para investigar os efeitos do pH inicial no processo de EC, vários testes precisam ser conduzidos (enquanto as outras condições são mantidas constantes). Uma série de 3 testes com o pH: 4, 7 e 10 foram conduzidos com um ajuste de pH um pouco antes de cada teste com NaOH e HCl e rendeu uma eficiência de remoção de 40% - 95,5% ocorrendo entre o pH de 4 - 7 enquanto atingia um certo estabilidade além do pH 10 (AITYOUB et al., 2020). O pH ideal é 7 - 8 (ZAZOULI; TAGHAVI, 2012; AITYOUB et al., 2020).

2.5.5 Tipo de fonte de alimentação

O tipo de fonte de alimentação para células EC é geralmente de corrente contínua (CC). O uso CC provoca a oxidação do ânodo e forma uma camada de óxido na passivação do cátodo. Isso geralmente causa um aumento do potencial passivo e, portanto, a um maior consumo de energia, bem como a uma diminuição do fluxo de corrente entre os eletrodos e a eficiência do processo de EC em geral (MOUSSA et al., 2017).

Este problema, passivação, pode ser combatido adicionando uma quantidade suficiente de íons cloreto que quebram a camada passiva ou aplicando uma corrente de pulso alternada impedindo a formação da camada passiva quando o eletrodo de Al ou Fe está sendo usado (YANG et al., 2015).

O uso de corrente alternada (CA) promete vida útil ao eletrodo devido à energização cíclica que leva ao retardo do consumo do eletrodo tradicional que ocorre com a fonte de alimentação CC (MOLLAH et al., 2004). Os efeitos da CA e CC na água por eletrocoagulação, apresentam resultados que comprovam o baixo consumo de energia e maior eficiência de remoção de efluentes por meio do uso de fonte de alimentação CA (VASUDEVAN; LAKSHMI, 2011). Há uma maior eficiência de remoção em um curto tempo operacional, bem como nenhuma

diminuição na eficiência de remoção com o tempo, acompanhada por baixos custos operacionais de APC quando comparada à fonte de alimentação CC comprovada por (EYVAZ et al., 2009).

2.5.6 Efeito da velocidade de agitação magnética

O efeito da velocidade de agitação magnética tem um papel central na eficiência do processo da EC. Quatro tipos diferentes de velocidades foram analisadas 0, 300, 450 e 600 rev.min⁻¹. Observou-se que a remoção do efluente foi baixa sem qualquer agitação e não ultrapassou 68% para um tempo de EC de 30 min e 80% para um tempo de 60 min. A remoção do efluente foi moderada com velocidade de agitação de 300 rev.min⁻¹. Na velocidade de agitação de 450 rev.min⁻¹, a remoção do efluente atingiu a porcentagem de 95% e 99,5% após 30 e 60 min. No entanto, houve uma diminuição na eficiência de remoção quando a agitação atingiu 600 rev.min⁻¹ devida à quebra dos flocos. Salienta-se que uma agitação excessiva causa o rompimento dos flocos e ao aumento do consumo de energia elevando os custos de operação (BRAHMI et al., 2019).

2.5.7 Efeito do suporte eletrolítico

O eletrólito de suporte é responsável por aumentar a condutividade da solução que por sua vez diminui o consumo de energia, ao mesmo tempo evitando o efeito sobre os íons de migração e influenciando a cinética de certas reações eletroquímicas que ocorrem durante o processo de EC (GARCIA-SEGURA et al., 2017).

2.5.8 Tempo de eletrólise

O tempo de eletrólise está diretamente ligado a eficiência de remoção dos contaminantes (DARBAN et al., 2020). Tendo dependência de demais parâmetros associadas, como por exemplo, a distância entre os eletrodos, que quanto menor a distância, menos tempo é necessário para que o processo de EC atinja a eficiência máxima, e portando, menor será o custo operacional (AITYOUB et al., 2020).

2.5.9 Efeito da temperatura inicial

A temperatura inicial da água tem efeito relevante na redução do tempo de eletrólise e no aumento da eficiência da remoção dos contaminantes. O aumento desse parâmetros melhorou significativamente a transferência de massa e a colisão das partículas. Os processos de EC devem começar com a temperatura alta para uma melhor eficiência de remoção (BRAHMAI et al., 2018). A remoção de DQO, TSS e cor foram aumentados quando houve um aumento na temperatura (95% e 96,2% para COD, 93% e 94,75% para TSS, e 95% e 97% para a cor) (NAJE et al., 2016).

2.6 DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO

A gestão e desenvolvimento de um produto consiste na aplicação de técnicas, conhecimentos, habilidades e ferramentas que requerem a identificação de atividades a serem desenvolvidas, sendo estas realizadas em sequência ou simultaneidade, como parte de um processo metodológico para a criação ou melhoria de um determinado produto (BACK et al., 2008).

O Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) pode ser definido como um conjunto de atividades por meio das quais se busca, a partir das necessidades do mercado e das possibilidades e restrições tecnológicas, e considerando as estratégias competitivas e de produto da empresa, chegar às especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção, para que a manufatura seja capaz de produzi-lo (ROZENFELD et al., 2006).

De forma sucinta, o processo de desenvolvimento de um produto pode ser observado na Figura 2. Na qual a estrutura metodológica proposta, apresenta em forma de fluxograma, que consiste nos desdobramentos das atividades principais de cada fase.

Figura 2 – Fases do desenvolvimento de produtos.



Fonte: (BACK et al., 2008)

Este processo de desenvolvimento engloba desde a fase de planejamento do produto, que consiste no plano estratégico, passando pelas fases de projeto do produto e processo de manufatura, ou seja, a concepção em si do produto, até a fase de planejamento de pós-venda: distribuição, transporte, utilização, manutenção e descarte (BACK et al., 2008).

3 METODOLOGIA

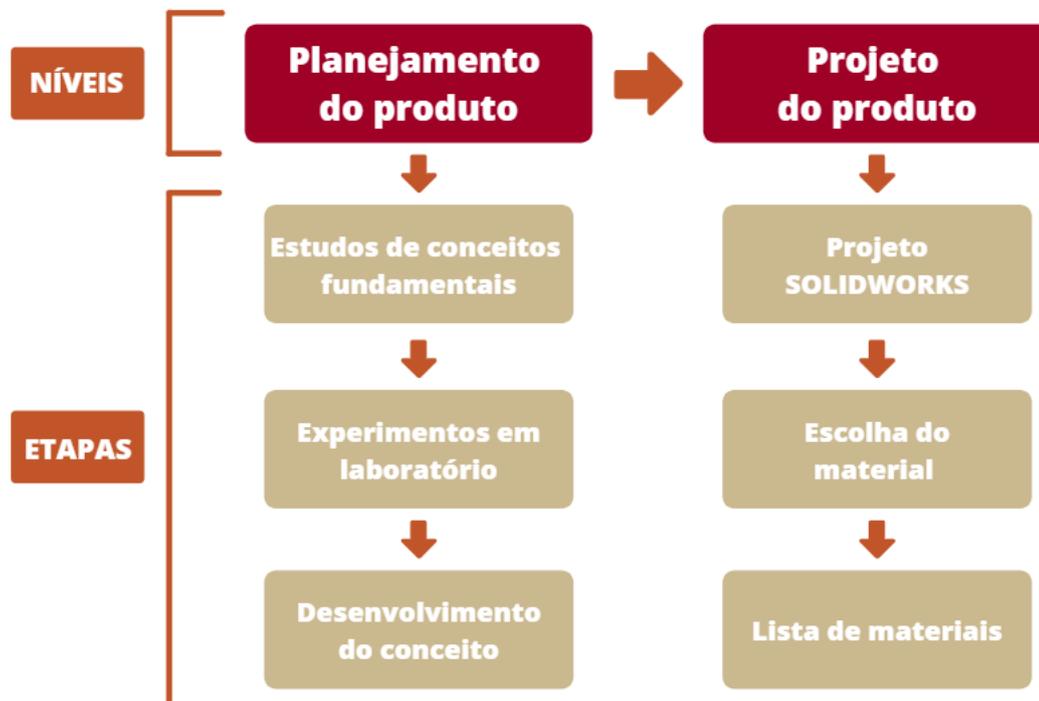
Na seção será identificada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do reator, a fim de alcançar os objetivos mencionados na Seção 1.1.

Para compreender o funcionamento de um reator de eletrocoagulação, foram realizados estudos de conceitos fundamentais e aplicação em experimentos controlados em laboratório.

O programa de computação gráfica permite a criação de objetos com modelagem tridimensional é essencial para idealização de novos produtos como o apresentado neste projeto. Para coordenar, organizar e documentar a produção deste, fez-se necessário a utilização da ferramenta *SOLIDWORKS* que trabalha com a tecnologia chamada Computer Aided Design (CAD) para a criação de objetos sólidos.

Unindo o método de gestão Figura 2 e os referenciais teóricos, foi determinado as prioridades do projeto, gerando uma sequência de planejamento baseada em (BACK et al., 2008), dividida em dois níveis conforme a Figura 3.

Figura 3 – Divisão dos níveis e etapas do projeto.



Fonte: (do autor)

As fases foram simplificadas e resumidas conforme representação da Figura 3. Os níveis e etapas tinham como objetivo guiar, o desenvolvimento do projeto e controlar suas mudanças ao longo de cada nível. A cada etapa concluída, outra etapa era desenvolvida sequencialmente ou

simultaneamente.

O desenvolvimento iniciou pelo nível de planejamento do produto, conforme esquematizado na Figura 4, que engloba as etapas de estudo de conceitos fundamentais, que consiste entender de forma teórica o princípio de funcionamento de um reator de eletrocoagulação, passando pela etapa de realização de experimentos em laboratório, a onde foi utilizado um reator, e pela etapa de desenvolvimento do conceito. O desenvolvimento do conceito forneceu ideias, atributos e características funcionais para a geometria e materiais dos componentes do produto, fornecendo uma a visão informativa para o melhoramento do produto como um todo, dando continuidade ao nível de projeto do produto.

Figura 4 – Primeiro nível do projeto: Planejamento do produto.



Fonte: (do autor)

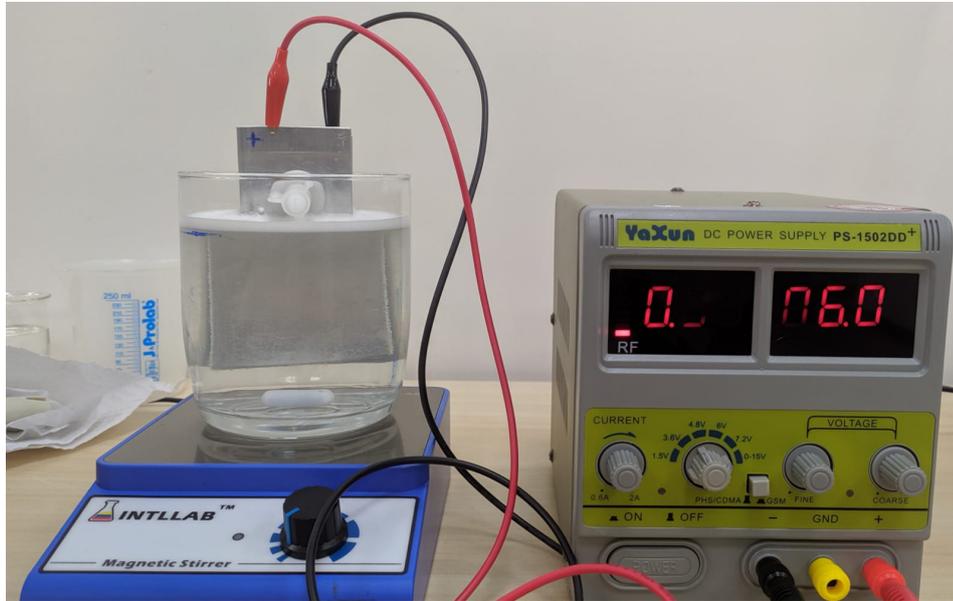
O reator de eletrocoagulação empregado no estudo da etapa "Experimento em laboratório" é bem simplista, contando com duas placas de alumínio como eletrodos ligadas a uma fonte de alimentação CC, separadas por dois tubos flexíveis transparente de plástico com cortes irregulares nas bordas, o que causa um espaçamento entre eletrodos inconstante, e suportadas por um parafuso plástico em um recipiente de vidro, sendo o fluido movimentado por agitação magnética, como exposto na Figura 5.

O reator utilizado contém problemas de escoamento de espuma, a mesma permanece acumulada na superfície, remoção do efluente tratado, é necessário remover toda a estrutura montada na parte superior do reator para retirar o efluente e possui limitação em número de eletrodos, o que aumenta o tempo de eletrolise, gerando mais custo de operação e baixa eficiência

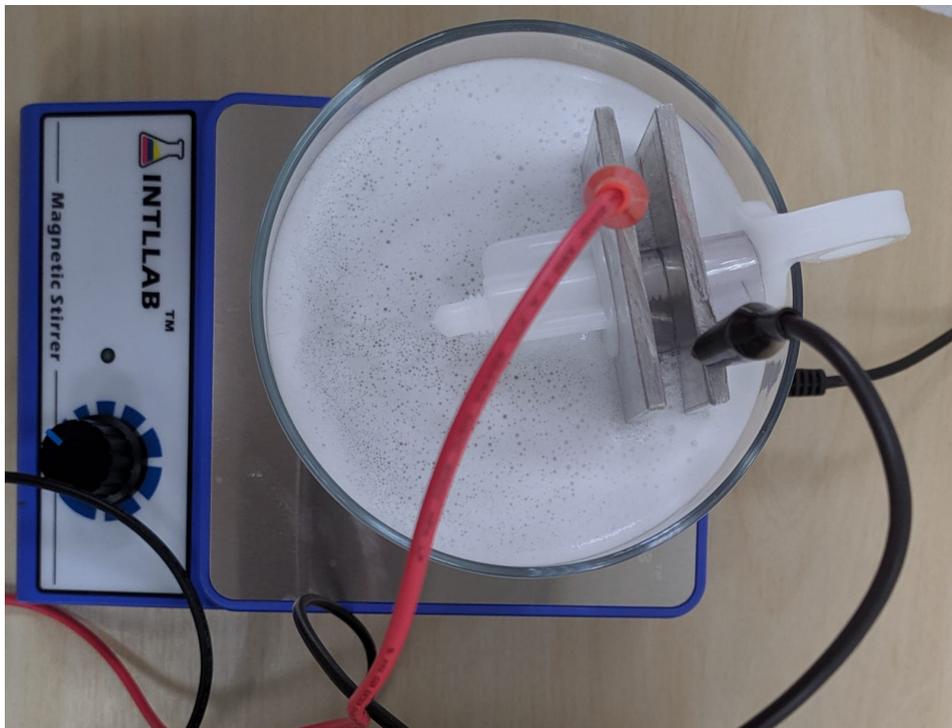
de processo. Este reator utilizado para estudos e experimentos foi a base para pensarmos em como melhorar a estrutura visando funcionamento e aplicação do método de eletrocoagulação.

Figura 5 – Experimento utilizando um reator de eletrocoagulação.

(a)



(b)



Fonte: (do autor)

No nível sequente, projeto do produto, foi definida a geometria tridimensional dos componentes do reator, sua montagem conceitual e seu material compatível com a aplicação de cada componente. Determinando a material, a lista de componentes foi obtida com os desenhos

do projeto do produto, como mostrado na Figura 6. Os desenhos técnicos, desenvolvidos no software *SOLIDWORKS*, e encontram-se na Apêndice.

Figura 6 – Segundo nível do projeto: Projeto do produto.



Fonte: (do autor)

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CARCAÇA DO REATOR

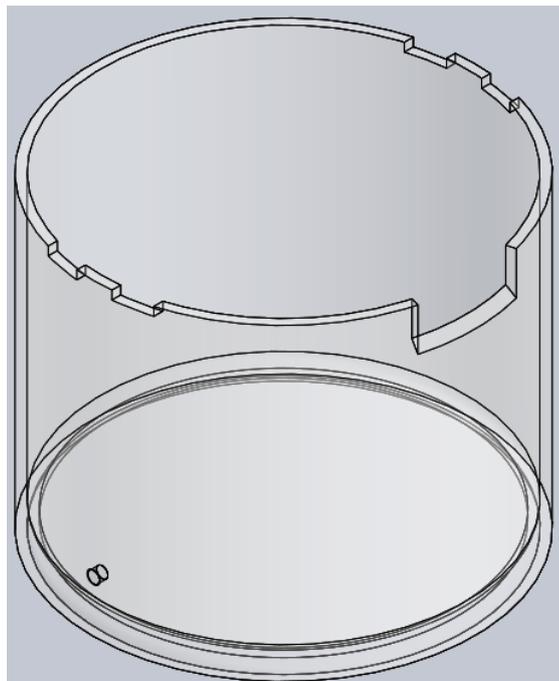
A geometria da carcaça do reator foi pensada para suportar todos os componentes utilizados durante o processo de eletrocoagulação, como mostrado na Figura 7.

A geometria em formato de cilindro vazado foi escolhida por não deter cantos vivos, o que evita lodo, partículas e espumas formados durante o processo de eletrocoagulação se acumulem, o que ocorre em com as carcaças de geometria retangular, facilitando sua limpeza. Tem uma capacidade de máxima de 5 L de fluido a ser tratado por sessão, sendo um excelente volume para análise em laboratório, diâmetro interno de 210 mm e espessura de parede de 5 mm.

Um furo rosqueado de 1/2" de diâmetro foi implantado na superfície lateral onde será conectada uma torneira para favorecer a remoção do fluido tratado ao final do processo, sem a necessidade de desmontar a estrutura instalada.

Na superfície lateral mais ao topo existem cinco rasgos. Há um rasgo com profundidade de 20 mm, que está na altura da superfície fluido, e chanfrado em 45° para facilitar o escoamento da espuma, auxiliado pelo mecanismo de agitação do fluido. Há outros quatro rasgos com profundidade de 5 mm cada para apoiar os dois suportes dos eletrodos.

Figura 7 – Carcaça do reator.



Fonte: (do autor)

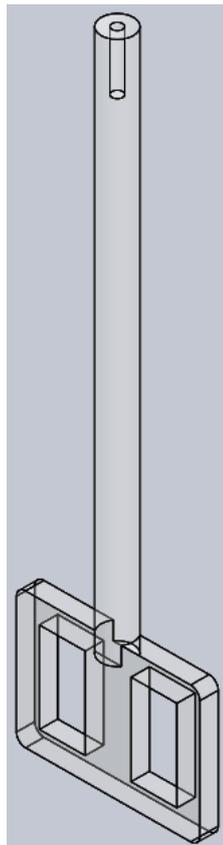
4.2 MECANISMO DE AGITAÇÃO

O mecanismo de agitação é composto por três peças. Motor elétrico, hélice de agitação e suporte do motor. Contudo, para este projeto apenas as duas últimas foram desenhadas no software.

A hélice de agitação possui geometria da pá retangular vazada, com comprimento, espessura e altura de 40 mm, 4 mm e 30 mm, respectivamente, somada a uma haste furada com comprimento e diâmetro de 120 mm e 7 mm, nesta ordem, que se conecta ao eixo do motor elétrico no topo com diâmetro de 2,3 mm, e altura de 13 mm, como mostrado na Figura 8. Esta geometria de pá gera fluxo tangencial, pouca turbulência e é usada em baixas velocidades (LABSTORE, 2021), portanto, é adequada para a aplicação no projeto, pois evita a quebra dos flocos formados durante o processo, e alçamento do lodo durante o funcionamento.

As dimensões da pá são limitadas, principalmente no comprimento, para que a mesma não se choque com as placas de eletrodos durante o processo de eletrocoagulação.

Figura 8 – Hélice de agitação.



Fonte: (do autor)

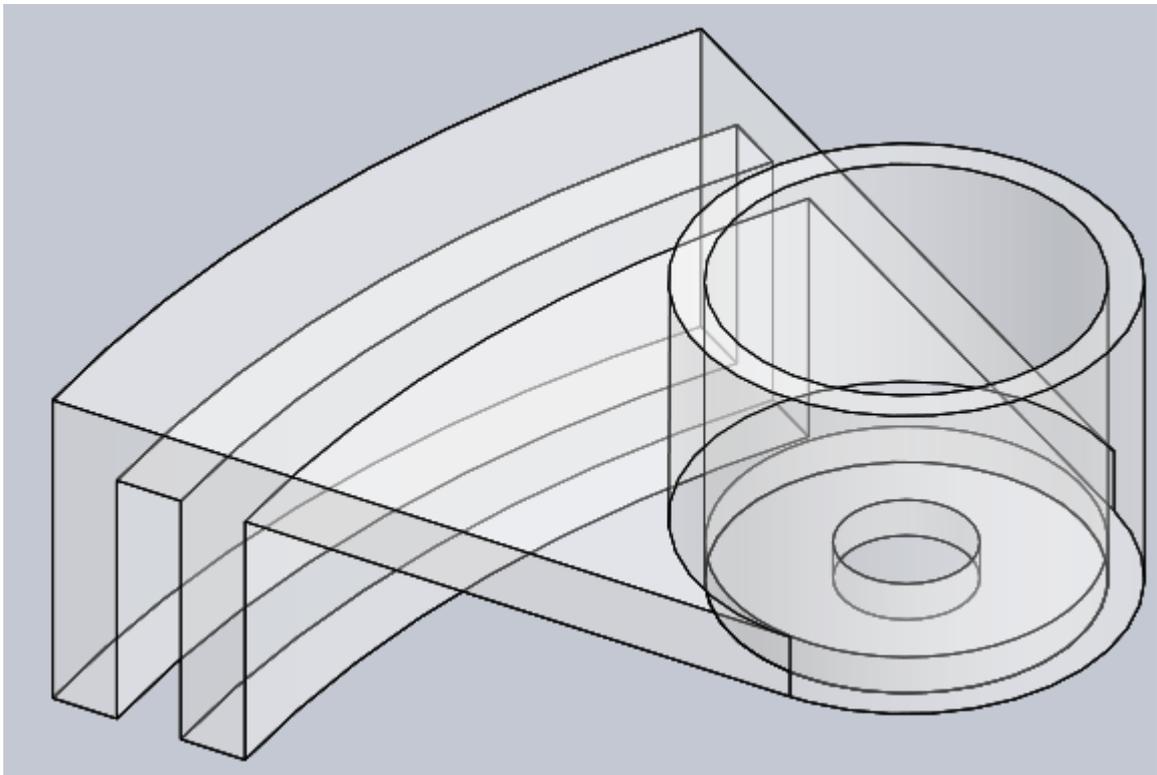
O suporte do motor foi projetado para ser fixado na lateral da carcaça do reator, ou seja, possui um encaixe de abertura de 5 mm entre arcos, e para sustentar o mini motor elétrico *Neoyama*, de baixo valor financeiro agregado e acessível. Este suporte possui um diâmetro

interno de 27,5 mm e espessura de 2,5 mm, adicionado a um furo na superfície inferior 10 mm de diâmetro para que a haste de agitação conecte-se ao eixo do motor, como mostrado na Figura 9.

A geometria do suporte do motor pode ser adaptada para sustentar outros tipos motores, utilizando-se, a ficha de desenho técnico que se encontra-se no Apêndice A.

Vale considerar que é necessário controlar a potência do motor, objetivando uma baixa rotação do eixo para que não ocorra a quebra dos flocos, e conseqüentemente, um menor gasto de eletricidade e tempo de processo, como demonstrado por Brahmi et al. (2019).

Figura 9 – Suporte do motor.



Fonte: (do autor)

4.3 SUPORTE DOS ELETRODOS

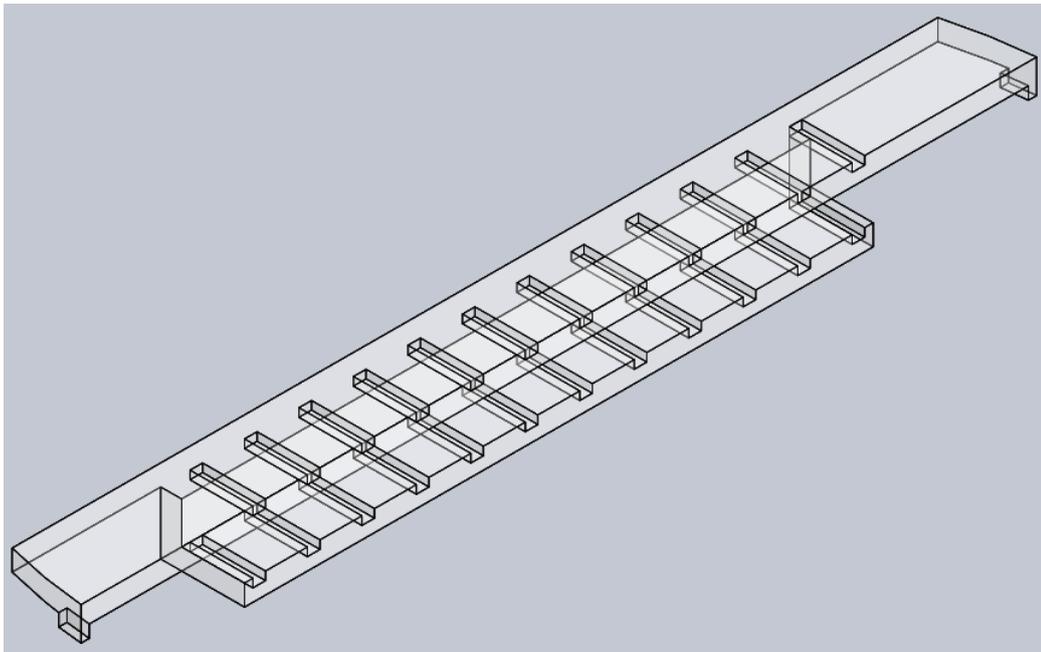
A sustentação dos eletrodos foi pensada para que as placas de eletrodos fiquem fixas e espaçadas igualmente em 10 mm, e também, para que os eletrodos não transmitam corrente elétrica para os demais componentes do reator, evitando risco de choque elétrico para o usuário, e que aproveitasse a maior área superficial útil dos eletrodos durante todo o processo de eletrocoagulação, melhorando a eficiência, como mostrado na Figura 10.

O suporte possui um comprimento, largura e altura de 228 mm, 20 mm e 20 mm, respectivamente. Contando também, com 12 ranhuras de comprimento, largura e altura 15 mm, 3 mm e 2 mm, na devida ordem, com o objetivo de fixar as placas de eletrodos que possuem

dimensões de 50 mm, 3 mm e 110 mm de comprimento, espessura e altura, nesta ordem, com mostrado na Figura 11.

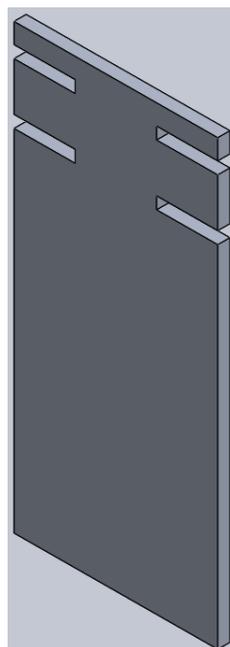
As extremidades serão apoiadas sobre os quatro rasgos da carcaça do reator, já mencionados, e contém um ressalto em cada lado para impedir a queda do suporte dentro do reator.

Figura 10 – Suporte dos eletrodos.



Fonte: (do autor)

Figura 11 – Placa de eletrodo.



Fonte: (do autor)

4.4 PROJETO CONCEITUAL DO REATOR

Durante o nível do Projeto do produto houve a escolha da material para cada componente, resultando na lista de materiais, como mostrada na Tabela 1. E para todos, exceto ao eletrodo, o acrílico foi atribuído, pois, este reator está sendo projetado para estudar a aplicação do método de eletrocoagulação no tratamento de efluente advindos da industria saneante, e portanto, o acrílico possui alta resistência química a soluções aquosas e base inorgânicas, como por exemplo, água sanitária, que é um produto saneante (BELMETAL, 2021).

Também, o acrílico é 50% mais leve, 60% mais econômico e possui alta resistência ao impacto, cerca de 10 vezes a mais que do que a segunda matéria-prima cogitada, o vidro. Caso houver a quebra, há uma tendência de não fragmentação, ou seja, não há a geração de partes cortantes, resultando em mitigação acidentes (MACEDOPLASTICOS, 2021; INDAC, 2021).

Por fim, há a questão didática, o acrílico possui coloração transparente e cristalino, sendo ideal para observação do funcionamento do processo.

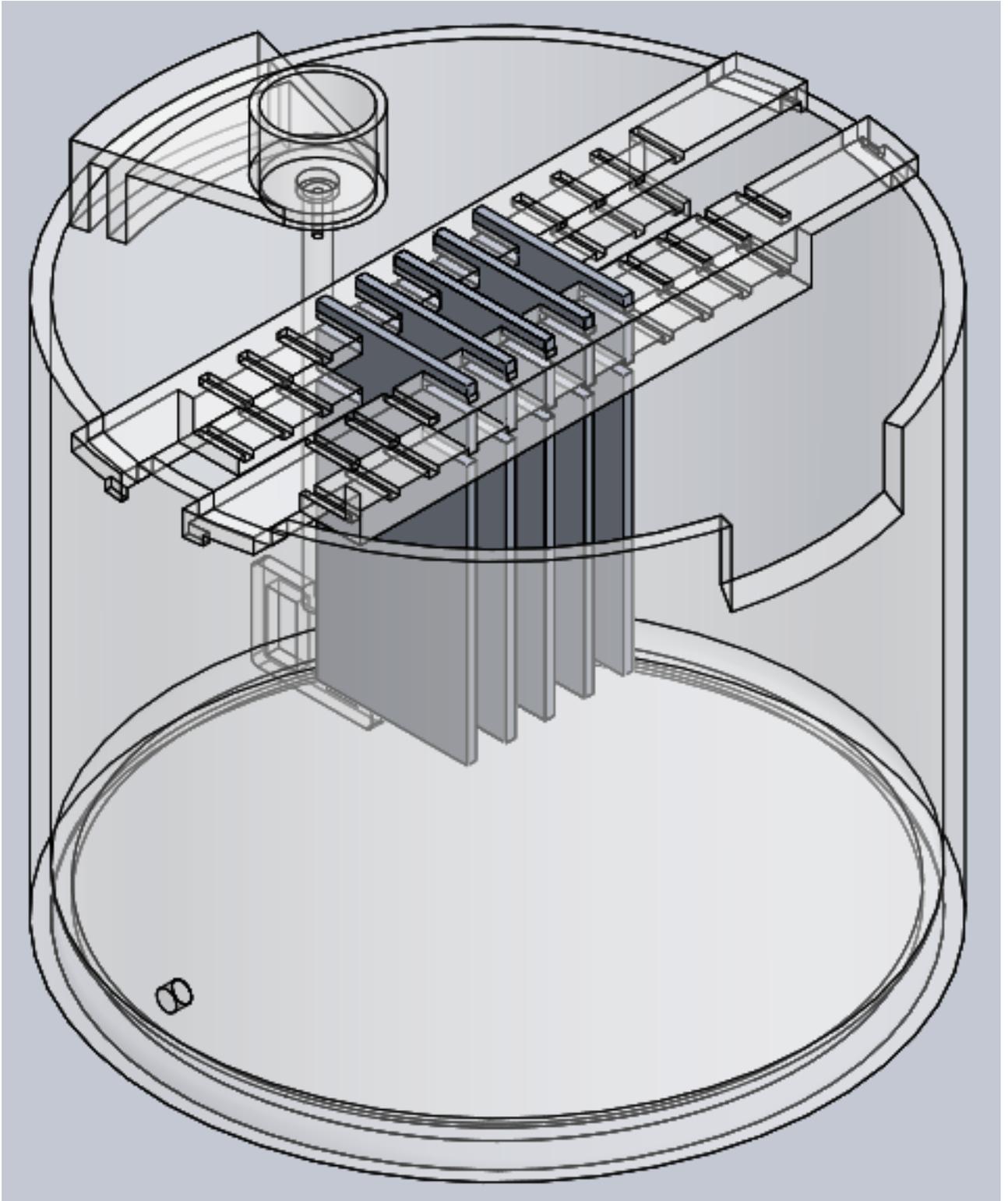
Tabela 1 – Lista de materiais.

COMPONENTES DO REATOR	MATERIAL
Eletrodo	Alumínio
Suporte do motor	Acrílico
Carcaça do reator	Acrílico
Hélice de agitação	Acrílico
Suporte dos eletrodos	Acrílico

Fonte: (do autor)

No nível Projeto de produto, foi gerado a montagem do projeto conceitual do reator, ou seja, a união de todos os componentes projetados no software CAD, como apresentado na Figura 11. Assim como também, foram criadas as fichas de detalhamento técnico de cada componentes, os quais se encontram na Seção de Apêndice.

Figura 12 – Projeto conceitual do reator de eletrocoagulação.



Fonte: (do autor)

5 CONCLUSÕES

Em síntese, no presente trabalho, uma ampla pesquisa bibliográfica foi realizada, visando entender o método de eletrocoagulação, funcionamento do reator e as características de cada componente que o compõem. Método de gestão e desenvolvimento de produto e ferramenta de modelagem tridimensional foram utilizados para auxiliar a criação do produto e documentar sua ficha de detalhamento técnico.

As etapas de Estudos de conceitos fundamentais e Experimentos em laboratório foram de sensível relevância para a geração do conceito do reator, uma vez que propiciaram a concepção de ideias para a elaboração dos componentes projetados no software CAD, visando o aperfeiçoamento, otimização e melhor adequação no funcionamento do reator ao processo de eletrocoagulação.

Os desenhos técnicos e detalhamento técnico dos componentes do reator foram adequadamente documentados, possibilitando a manutenção futura do reator, caso houver avarias ou quebra dos mesmos.

O desafio de projetar um reator para tratamento de efluentes foi devidamente finalizado. A princípio, o reator tem potencial para realizar o tratamento de águas residuais da indústria saneante e poderá auxiliar em futuras pesquisas. Além da complexidade de desenvolver o reator de geometria simples e acessível, os recursos financeiros eram escassos, fazendo com que o projeto fosse limitado e tivesse que ser adaptado apenas aos níveis de Planejamento de conceito e Projeto de produto, tendo potencial de ser expandido aos níveis de Processo de manufatura e Teste de produto, que abrange a fabricação e validação do produto.

5.1 RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

1. Projeto de manufatura do reator
2. Aferição e teste do produto
3. Aplicação e análise a diferentes tipos de efluente de variadas fontes industriais
4. Pesquisar e aplicar outros metais como eletrodos (Ferro ou a combinação de eletrodos de Ferro e Alumínio).
5. Trabalhar na melhoria continua do reator, objetivando adaptação de outro método de tratamento.

REFERÊNCIAS

- AITYOUB, A. et al. Optimization of physicochemical parameters during the electrocoagulation cadmium elimination. **Journal of Chemistry**, Hindawi Limited, v. 2020, p. 1–12, ago. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2020/3071420>>. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- ANVISA, A. N. d. V. S. **Resolução - RDC Nº 184, de 22 de Outubro de 2001**. [S.l.], 2001. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/anvisa/2001/rdc0184_22_10_2001.html>. Citado na página 15.
- ASWATHY, P. et al. Removal of organics from bilge water by batch electrocoagulation process. Elsevier BV, v. 159, p. 108–115, fev. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2016.01.001>>. Citado na página 12.
- BABU, D. S. et al. Detoxification of water and wastewater by advanced oxidation processes. Elsevier BV, v. 696, p. 133961, dez. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133961>>. Citado na página 12.
- BACK, N. et al. **Projeto integrado de produtos : planejamento, concepção e modelagem**. 1ta. ed. Barueri: Manole, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- BELMETAL. 2021. <<https://www.aecweb.com.br/cls/catalogos/belmetal/chapas-acrilico.pdf>>. Accessed: 2021-11-22. Citado na página 30.
- BRAHMAI, K. et al. Treatment of heavy metal polluted industrial wastewater by a new water treatment process: ballasted electroflocculation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 344, p. 968–980, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- BRAHMI, K. et al. Investigation of electrocoagulation reactor design parameters effect on the removal of cadmium from synthetic and phosphate industrial wastewater. **Arabian Journal of Chemistry**, Elsevier BV, v. 12, n. 8, p. 1848–1859, dez. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.12.012>>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 28.
- CENI, G. **Estudo da eletrocoagulação aplicado associativamente com peróxido de hidrogênio no tratamento de efluentes líquidos de laticínios**. 84 p. Tese (Doutorado) — Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e Missões, Erechim, 2017. Citado na página 17.
- CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 38, n. 1, p. 11–41, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 15.
- CHENG, J. **Biomass to renewable energy processes**. 2ta. ed. Boca Raton: CRC Press, 2017. Citado na página 11.
- COMBATT, M. P. M. et al. Validação do processo de eletrocoagulação e avaliação da eletrodissolução de eletrodos no tratamento de efluentes de abatedouros de aves. Sociedade Brasileira de Química (SBQ), fev. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170008>>. Citado na página 11.

DARBAN, A. et al. A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. **Current Opinion in Electrochemistry**, Elsevier BV, v. 22, p. 154–169, ago. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.05.009>>. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

DIMOGLO, A. et al. Electrocoagulation/electroflotation as a combined process for the laundry wastewater purification and reuse. Elsevier BV, v. 31, p. 100877, out. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100877>>. Citado na página 11.

EL-NAAS, M. H. et al. Assessment of electrocoagulation for the treatment of petroleum refinery wastewater. Elsevier BV, v. 91, n. 1, p. 180–185, out. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.08.003>>. Citado na página 11.

EYVAZ, M. et al. The effects of alternating current electrocoagulation on dye removal from aqueous solutions. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier BV, v. 153, n. 1-3, p. 16–22, nov. 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.05.028>>. Citado na página 20.

FARHADI, S. et al. Comparison of COD removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation, photoelectrocoagulation, peroxi-electrocoagulation and peroxi-photoelectrocoagulation processes. Elsevier BV, v. 219-220, p. 35–42, jun. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.03.013>>. Citado na página 12.

GARCIA-SEGURA, S. et al. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 801, p. 267–299, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

GATSIOS, E.; HAHLADAKIS, J. N.; GIDARAKOS, E. Optimization of electrocoagulation (EC) process for the purification of a real industrial wastewater from toxic metals. **Journal of Environmental Management**, Elsevier BV, v. 154, p. 117–127, maio 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.02.018>>. Citado na página 19.

GERBA, C. P. Quaternary ammonium biocides: efficacy in application. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 81, n. 2, p. 464–469, 2014. Citado na página 11.

HAKIZIMANA, J. N. et al. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. Elsevier BV, v. 404, p. 1–21, fev. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>>. Citado na página 11.

HENRIQUES, D. M. **Degradação de Nonilfenol Polietoxilado e de Efluente Têxtil por Meio de Eletrocoagulação e Processos Fenton**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Maria, 2004. Citado na página 13.

INDAC. 2021. <<https://www.indac.org.br/caracteristicas-do-acrilico/>>. Accessed: 2021-11-22. Citado na página 30.

KABDAŞLI, I. et al. Electrocoagulation applications for industrial wastewaters: a critical review. **Environmental Technology Reviews**, Informa UK Limited, v. 1, n. 1, p. 2–45, nov. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/21622515.2012.715390>>. Citado na página 19.

KHANDERGAR, V.; SAROHA, A. K. Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent – a review. **Journal of Environmental Management**, v. 128, p. 949–963, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 19.

KOBYA, M.; DEMIRBAS, E. Evaluations of operating parameters on treatment of can manufacturing wastewater by electrocoagulation. **Journal of Water Process Engineering**, v. 8, p. 64–74, 2015. Citado na página 16.

KRYSTINIK, P.; TITO, D. N. Key process parameters affecting performance of electrocoagulation. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 117, p. 106–112, 2017. Citado na página 18.

LABSTORE. 2021. <<https://blog.labstore.com.br/agitador-mecanico-tipos-helice/>>. Accessed: 2021-11-22. Citado na página 27.

LI, X. et al. Occurrence of quaternary ammonium compounds QACs and their application as a tracer for sewage derived pollution in urban estuarine sediments. **Environmental Pollution**, v. 185, p. 127–133, 2014. Citado na página 15.

MACEDOPLASTICOS. 2021. <<https://macedoplasticos.com.br/acrilico/acrilico-tabela-de-propriedades/>>. Accessed: 2021-11-22. Citado na página 30.

MANSOORIAN, H. J.; MAHVI, A. H.; JAFARI, A. J. Removal of lead and zinc from battery industry wastewater using electrocoagulation process: Influence of direct and alternating current by using iron and stainless steel rod electrodes. **Separation and Purification Technology**, Elsevier BV, v. 135, p. 165–175, out. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.08.012>>. Citado na página 19.

MENEZES, P. A. V. Tensoativos na indústria têxtil. **Química Têxtil**, n. 80, p. 54–74, Setembro 2005. Citado na página 15.

MODENES, A. et al. Aplicação da técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouro de aves. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 3, p. 571–578, 2017. Citado na página 16.

MOLLAH, M. et al. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 114, n. 1-3, p. 199–210, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 19.

MOUSSA, D. T. et al. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: potentials and challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 186, p. 24–41, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 12, 13, 14, 18 e 19.

MUDDMANN, T.; HAUPT, D.; SIEVERS, M. Electrochemical reactors for wastewater treatment. **ChemBioEng Reviews**, v. 6, n. 5, p. 142–156, 2019. Citado na página 16.

NAJE, A. S. et al. Electrocoagulation using a rotated anode: A novel reactor design for textile wastewater treatment. **Journal of Environmental Management**, v. 176, p. 34–44, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

NIZA, N. M. et al. Performance of batch electrocoagulation with vibration-induced electrode plates for landfill leachate treatment. Elsevier BV, v. 36, p. 101282, ago. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101282>>. Citado na página 11.

PADMAJA, K.; CHERUKURI, J.; REDDY, M. A. A comparative study of the efficiency of chemical coagulation and electrocoagulation methods in the treatment of pharmaceutical effluent. Elsevier BV, v. 34, p. 101153, abr. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101153>>. Citado na página 12.

PERTILE, T. S. **Avaliação do processo de eletrocoagulação aplicado a efluentes cianídricos da indústria galvânica**. 100 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014. Citado na página 16.

PINHEIRO, A. M. **Pós-tratamento de efluente saneante domissanitário por ozonização convencional e catalítica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2014. Citado na página 15.

POZNYAK, A.; CHAIREZ, I.; POZNYAK, T. A survey on artificial neural networks application for identification and control in environmental engineering: Biological and chemical systems with uncertain models. **Annual Reviews in Control**, v. 48, p. 450–272, 2019. Citado na página 11.

ROZENFELD, H. et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produtos: uma referência para a melhoria do processo**. 1ta. ed. São Paulo: Saraiva, 2006. Citado na página 21.

RUFATO, E. D. **ESTUDO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES DE ABATEDOUROS DE AVES**. 53 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, Polotina, 2018. Citado na página 11.

SOUZA, P. **Aplicação do processo de eletrocoagulação no tratamento de efluentes da indústria têxtil**. 163 p. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016. Citado na página 17.

TAHREEN, A.; JAMI, M. S.; ALI, F. Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. Elsevier BV, v. 37, p. 101440, out. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101440>>. Citado na página 11.

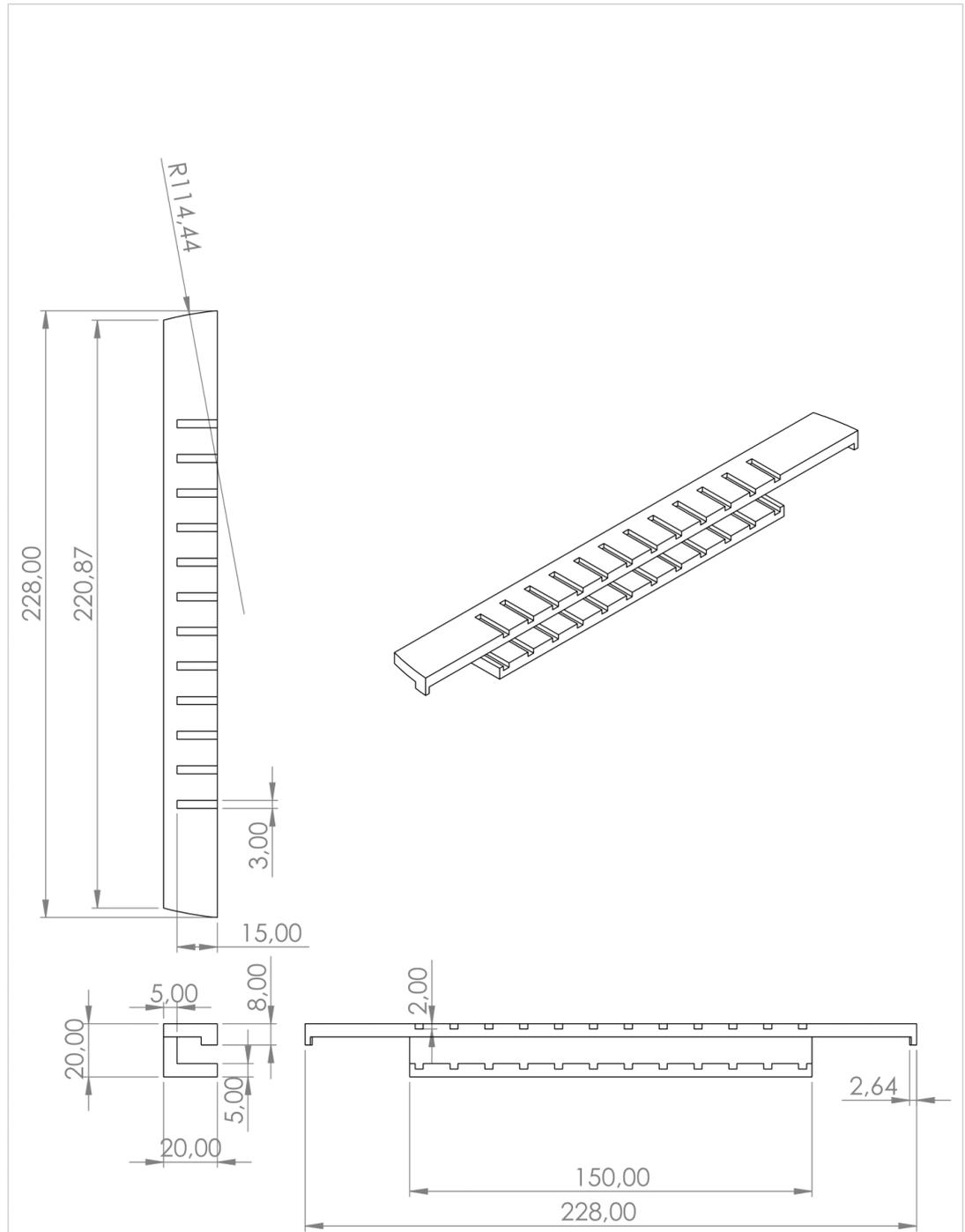
TEZEL, U.; PAVLOSTATHIS, S. G. Quaternary ammonium disinfectants: microbial adaptation, degradation and ecology. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 33, p. 296–304, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

VASUDEVAN, S.; LAKSHMI, J. Effects of alternating and direct current in electrocoagulation process on the removal of cadmium from water – a novel approach. **Separation and Purification Technology**, Elsevier BV, v. 80, n. 3, p. 643–651, ago. 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.06.027>>. Citado na página 19.

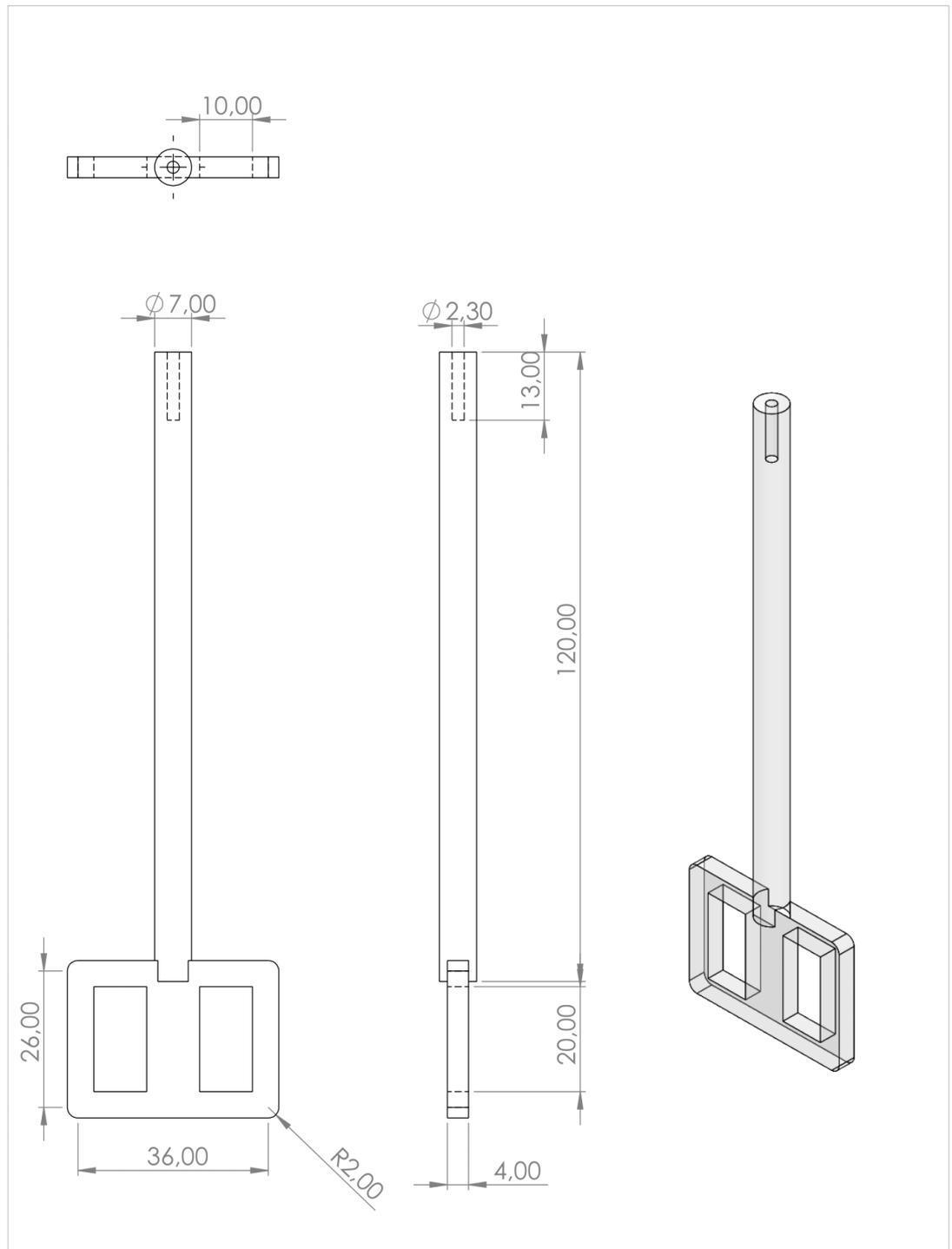
VEPSÄLÄINEN, M.; PULLIAINEN, M.; SILLANPÄÄ, M. Effect of electrochemical cell structure on natural organic matter (NOM) removal from surface water through electrocoagulation (EC). **Separation and Purification Technology**, Elsevier BV, v. 99, p. 20–27, out. 2012. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2012.08.011>>. Citado na página 19.

YANG, Z. et al. The behavior of dissolution/passivation and the transformation of passive films during electrocoagulation: Influences of initial pH, Cr(VI) concentration, and alternating pulsed current. **Electrochimica Acta**, Elsevier BV, v. 153, p. 149–158, jan. 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.11.183>>. Citado na página 19.

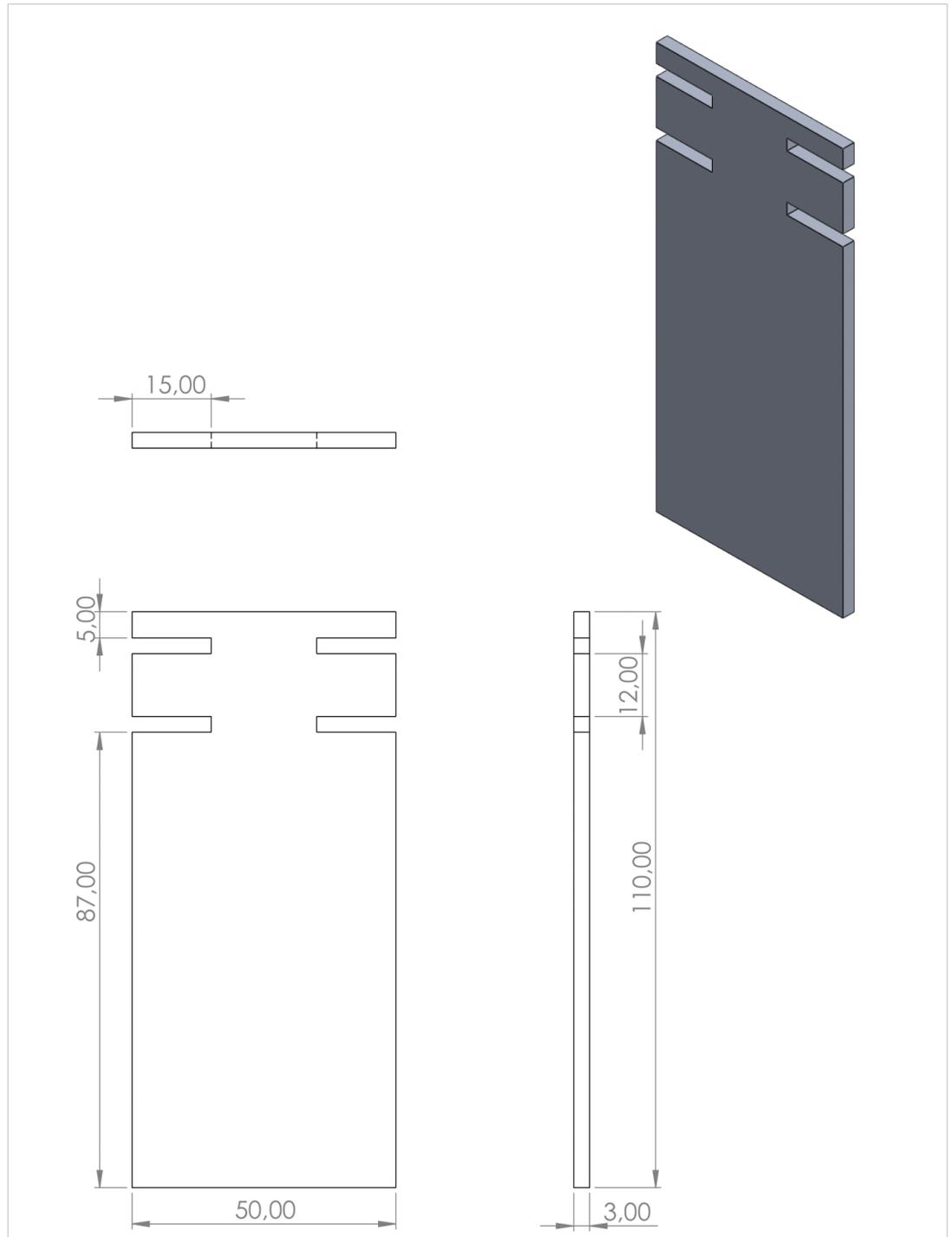
ZAZOULI, M. A.; TAGHAVI, M. Phenol removal from aqueous solutions by electrocoagulation technology using iron electrodes: effect of some variables. **Journal of Water Resource and Protection**, v. 04, n. 11, p. 980–983, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 19.



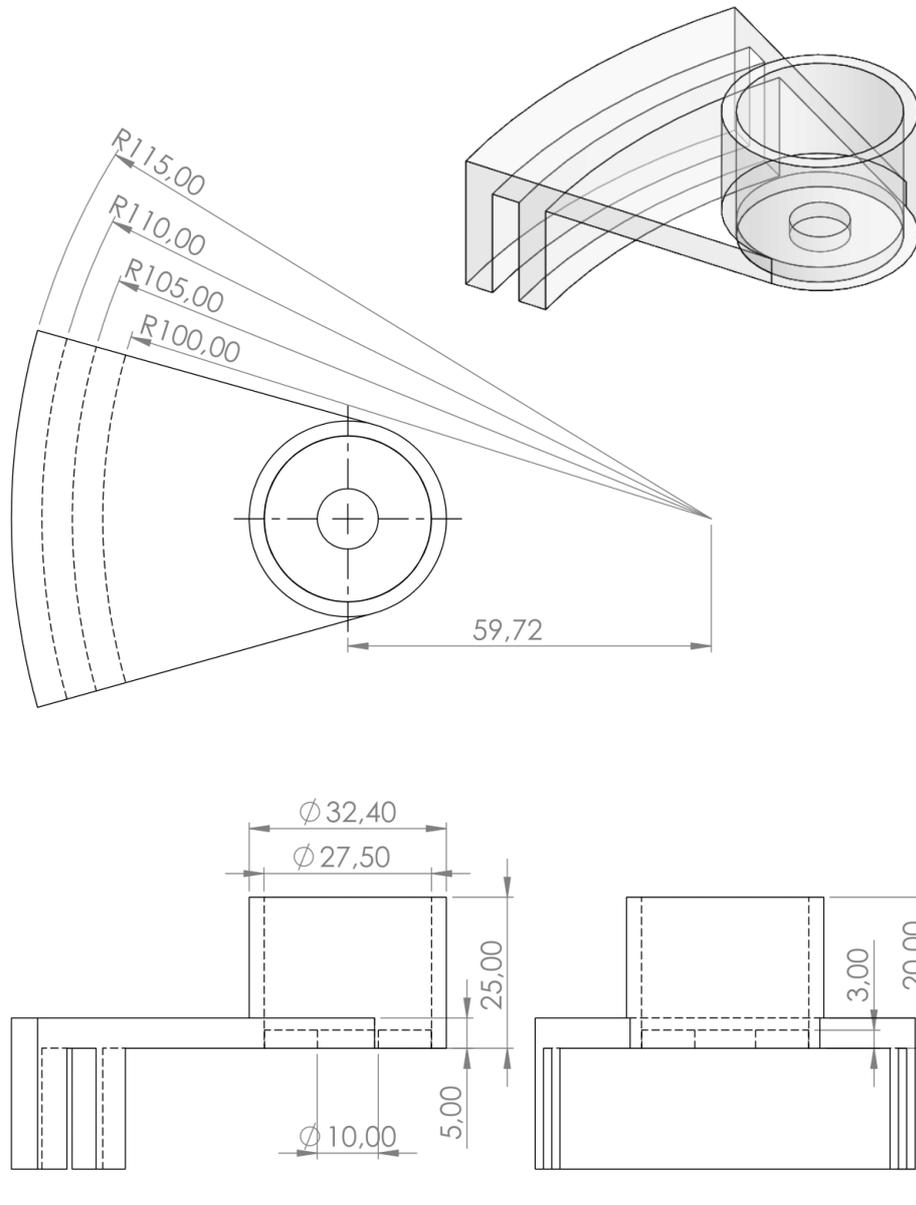
	SUPORE DOS ELETRODOS		A4
	MATERIAL: ACRÍLICO		
	HENRIQUE NUNES	ESCALA: 1:2	FOLHA 1 DE 1



 <p>UFPE</p>	HÉLICE DE AGITAÇÃO		A4
	MATERIAL: ACRÍLICO		
	HENRIQUE NUNES	ESCALA: 1:1	FOLHA 1 DE 1



 <p>UFPE</p>	ELETRODO		A4
	MATERIAL: ALUMÍNIO		
	HENRIQUE NUNES	ESCALA: 1:1	FOLHA 1 DE 1



SUPORTE DO MOTOR ELÉTRICO

A4

MATERIAL: ACRÍLICO

HENRIQUE NUNES

ESCALA: 1:1

FOLHA 1 DE 1