

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ITALO VIDAL DA SILVA

**TRATAMENTO DE ÁGUA OLEOSA MEDIANTE PROCESSO DE
ELETROFLOCULAÇÃO COM ELETRODOS DE ALUMÍNIO A
PARTIR DE MATERIAIS RECICLADOS**

JOÃO PESSOA – PB 2023

ITALO VIDAL DA SILVA

**TRATAMENTO DE ÁGUA OLEOSA MEDIANTE PROCESSO DE
ELETROFLOCULAÇÃO COM ELETRODOS DE ALUMÍNIO A PARTIR DE
MATERIAIS RECICLADOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dra. Fabíola Dias da Silva
Curbelo

Coorientador: Prof. Dr. Rennio Felix de Sena

**JOÃO PESSOA – PB
2023**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586t Silva, Italo Vidal da.

Tratamento de água oleosa mediante processo de eletrofloculação com eletrodos de alumínio a partir de materiais reciclados / Italo Vidal da Silva. - João Pessoa, 2023.

63 f. : il.

Orientação: Fabíola Dias da Silva Curbelo.

Coorientação: Rennio Felix de Sena.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Tratamento de efluente. 2. Tratamento de água - Processo eletrolítico. 3. Análise físico-química. 4. Águas residuais oleosas. 5. Eletrofloculação - Materiais reciclados. I. Curbelo, Fabíola Dias da Silva. II. Sena, Rennio Felix de. III. Título.

UFPB/BC

CDU 628.16(043)

ITALO VIDAL DA SILVA

**TRATAMENTO DE ÁGUA OLEOSA MEDIANTE PROCESSO DE
ELETROFLOCULAÇÃO COM ELETRODOS DE ALUMÍNIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Aprovada em 30 de março de 2023.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dra. Fabíola Dias da Silva Curbelo – PPGEQ/DEQ/CT/UFPB
Orientadora



Prof. Dr. Rennio Felix de Sena – DEQ/CT/UFPB
Coorientador



Prof. Dr. Edson de Andrade Araujo – UFCG
Examinador Externo



Prof. Dra. Lígia Rodrigues Sampaio – IFPE/RECIFE
Examinador Externo

Aos meus pais, familiares e amigos que participaram da minha caminhada,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, pela vida, saúde e pelas oportunidades que me foram dadas por ele.

Agradeço a meus pais pelo apoio e ajuda em toda minha trajetória de vida.

Agradeço aos amigos que fiz durante esta jornada de vida, pela amizade e descontração, que fizeram meu cotidiano mais feliz.

Agradeço a minha orientadora, Professora Doutora Fabíola Dias da Silva Curbelo, e coorientador, Professor Doutor RENNIO FELIX DE SENNA, pela orientação, confiança, pelas contribuições teóricas, pela paciência durante a elaboração da pesquisa e do trabalho.

Aos professores que compõem a banca avaliadora: Professora Doutora Lígia Rodrigues Sampaio e o Professor Doutor Edson de Andrade Araujo, por todas as contribuições e avaliações sobre o presente trabalho.

Agradeço aos professores e contribuintes da Universidade Federal da Paraíba que participaram direta ou indiretamente, na minha trajetória na universidade, contribuindo com orientações, lições, amizade e paciência.

Agradeço ao Centro Universitário UNIFAVIP/WYDEN pela abertura de suas portas, colaborando com o laboratório, reagentes, equipamentos e suporte durante todas as atividades. Permitindo que o projeto pudesse ser feito.

Agradeço aos Técnicos em Laboratório, César Santos e Galego, pela ajuda durante os experimentos e disponibilidade de horários para utilização do laboratório.

Agradeço a Flávia Luiza, que me ajudou durante os experimentos e obtenção de dados.

Agradeço ao apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pelo suporte com a bolsa.

A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original.

Albert Einstein.

RESUMO

A água é um dos bens naturais mais importantes para a manutenção da vida no planeta e para o equilíbrio do seu ecossistema, de tal forma que permite a manutenção e desenvolvimento da sociedade desde tempos antigos. Foi com o passar das décadas e com o desenvolvimento exponencial da sociedade, do campo científico e principalmente do setor industrial, que impactaram diretamente na diminuição de diversos recursos naturais, trazendo a tona, que o uso desenfreado e não sistemático desses recursos impactaria de forma severa não só o planeta, como a vida e desenvolvimento dos diversos campos, em destaque sobre a indústria petrolífera geradora de grande volume de efluentes oleosos produzido, também conhecido como água produzida de petróleo. Diante da crescente preocupação mundial com a crise hídrica se faz necessário à implementação de medida políticas e de conscientização ambiental, pela qualidade das águas, e desenvolvimento de alternativas para tratamentos de afluentes e efluentes surgem, como por exemplo, a eletrofloculação com a utilização de materiais reciclados. Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi analisar a eficiência do tratamento por via eletrofloculação utilizando eletrodos produzidos a partir de latas de alumínio recicladas para o tratamento em efluente oleoso sintético, avaliando o percentual de remoção a partir dos parâmetros das amostras antes e depois do tratamento por via eletrolítica, de acordo com as seguintes análises físico-químicas: Teor de óleos e graxas (TOG), alcalinidade total, cloretos, dureza total, pH, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO). Os experimentos foram realizados em uma escala laboratorial, sobre tensões de 5 e 12 volts e corrente contínua de 1,5 ampères provenientes de uma célula eletrolítica e eletrodos de alumínio provenientes de latinhas recicláveis. Os ensaios foram realizados em volume de 2,5 L, com duração 30 minutos, com ensaios sob agitação externa. Através das análises verificou-se a eficiência na remoção de impurezas. Os parâmetros físico-químicos se mostraram próximos em eficiência de remoção para as tensões de 5 volts e 12 volts, respectivamente, para TOG (98,10% e 99,68%), alcalinidade total (12,50% e 17,50%), cloretos (2,56% e 4,64%), dureza total (14,29% e 7,14%), pH (7,17 e 7,27), turbidez (84,31% e 99,84%) e DQO (38,97% e 54,74%), o custo para os processos (R\$ 1,92/m³ (US\$ 0,37/m³) e R\$ 4,12/m³ (US\$ 0,79/m³)), respectivamente. A proposta de eletrofloculação com materiais alternativos (reciclados) se mostrou uma alternativa eficaz no tratamento de águas residuais oleosas, conseguindo enquadrar os parâmetros restritivos para lançamento de efluentes em corpos hídricos.

Palavras-chave: Tratamento de efluente; Tratamento por via eletrolítica; Análise físico-química.

ABSTRACT

Water is one of the most important natural assets for the maintenance of life on the planet and for the balance of its ecosystem, in such a way that allows the maintenance and development of society since ancient times. Over the decades and with the exponential development of society, the scientific field, and especially the industrial sector, which directly impacted the reduction of various natural resources, bringing to light that the unbridled and unsystematic use of these resources would severely impact not only the planet, but also the life and development of the various fields, especially the oil industry, which generates a large volume of oily effluents, also known as produced petroleum water. Given the growing global concern about the water crisis, it is necessary to implement political measures and environmental awareness, for the quality of water, and to develop alternatives for the treatment of effluents and effluents, such as electroflocculation with the use of recycled materials. Thus, the objective of this work was to analyze the efficiency of the treatment for electroflocculation using electrodes produced from recycled aluminum cans for the treatment of synthetic oily effluent, evaluating the percentage of removal from the parameters of the samples before and after treatment by electrolytic means, according to the following physical-chemical analyses: oil and grease content (O&G), total alkalinity, chlorides, total hardness, pH, turbidity and chemical oxygen demand (COD). The experiments were performed on a laboratory scale, at voltages of 5 and 12 volts and a continuous current of 1.5 amperes from an electrolytic cell and aluminum electrodes from recyclable cans. The tests were performed in a 2.5 L volume, lasting 30 minutes, with tests under external agitation. Through the analyses the efficiency in the removal of impurities was verified. The physicochemical parameters were close in removal efficiency for the tensions of 5 volts and 12 volts, respectively, for O&G (98.10% and 99.68%), total alkalinity (12.50% and 17.50%), chlorides (2.56% and 4.64%), total hardness (14.29% and 7.14%), pH (7.17 and 7.27), turbidity (84.31% and 99.84%) and COD (38.97% and 54.74%), the cost for the processes (R\$ 1.92/m³ (US\$ 0.37/m³) and R\$ 4.12/m³ (US\$ 0.79/m³)), respectively. The proposal of electroflocculation with alternative materials (recycled) proved to be an effective alternative in the treatment of oily wastewater, managing to fit the restrictive parameters for discharge of effluents into water bodies.

Keywords: Wastewater treatment; Electrolytic treatment; Physical-chemical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Distribuição de água no planeta	18
Figura 3.2	Mecanismo do processo de eletrofloculação	25
Figura 3.3	Processo de formação de flóculos	26
Figura 4.1	Reator de vidro	32
Figura 4.2	Fonte geradora	32
Figura 4.3	Latinha utilizada	33
Figura 4.4	Eletrodo pós-tratamento físico	34
Figura 4.5	Chapa aquecedora e magnética	35
Figura 4.6	Esquema de montagem do sistema	36
Figura 4.7	Espectrofotômetro BEL	37
Figura 4.8	pHmetro de bancada	39
Figura 4.9	Turbidímetro TU430	39
Figura 4.10	Balança analítica BEL	40
Figura 5.1	Sistema com efluente bruto (A) e após 30 minutos de tratamento (B)	42
Figura 5.2	Concentração de alcalinidade total	44
Figura 5.3	Concentração de cloretos	45
Figura 5.4	Concentração da dureza total	46
Figura 5.5	pH das amostras	47
Figura 5.6	Turbidez	48
Figura 5.7	Turbidez do efluente oleoso após o tratamento a 5 e 12 volts	49
Figura 5.8	Concentração da DQO	49
Figura 5.9	Eletrodos montados em pares	51
Figura 5.10	Eletrodos utilizados no tratamento a 12 volts	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Análise elementar do óleo cru típico (% em peso)	20
Tabela 4.1	Dimensões e massa dos eletrodos	34
Tabela 4.2	Classificação quanto à concentração da dureza total	38
Tabela 5.1	Eficiência de remoção do teor de óleos e graxa	43
Tabela 5.2	Variação de massa dos eletrodos	51
Tabela 5.3	Consumo de energia	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1	Comparação entre processos de tratamento da água produzida	23
Quadro 4.1	Padrões de lançamento de efluentes CONAMA n° 357/05, n° 393/07 e n° 430/11	36
Quadro 5.1	Resumo das análises de caracterização das amostras	42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS	17
3 REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1 ÁGUA NO PLANETA	18
3.2 PETRÓLEO	19
3.2.1 Definição	19
3.2.2 Recuperação do petróleo	20
3.2.3 Água produzida	21
3.2.3.1 Tratamento	22
3.3 ELETROFLOCULAÇÃO	24
3.3.1 Mecanismo do processo	24
3.3.2 Eletrodo de alumínio	26
3.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ELETROFLOCULAÇÃO	27
3.4.1. Vantagens	27
3.4.2 Desvantagens	28
3.5 MATERIAIS RECICLADOS NO PROCESSO DE ELETROFLOCULAÇÃO	28
3.6 ESTADO DA ARTE	29
4 MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1 MATERIAIS	31
4.1.1 Água produzida sintética	31
4.2. EQUIPAMENTOS	31
4.2.1 Reator eletrolítico	32
4.2.2 Fonte geradora de energia	32
4.2.3 Eletrodos	33
4.2.4 Chapa magnética	35
4.3 TÉCNICA APLICADA	35
4.4 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA	36
4.4.1 Teor de óleos e graxas (TOG)	37
4.4.2 Determinação da alcalinidade	37
4.4.3 Determinação de cloretos	38

4.4.4 Determinação da dureza total	38
4.4.5 Determinação do pH	38
4.4.6 Determinação de turbidez	39
4.4.7 Demanda química de oxigênio (DQO)	39
4.4.8 Análise dos eletrodos	39
4.4.9 Consumo de energia	40
4.4.10 Custo operacional	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1. TEOR DE ÓLEOS E GRAXAS (TOG)	43
5.1.1 Análise do TOG	43
5.2 ALCALINIDADE TOTAL	44
5.3 CLORETOS	45
5.4 DUREZA TOTAL	46
5.5 pH	47
5.6 TURBIDEZ	48
5.7 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO)	49
5.8 ANÁLISE DOS ELETRODOS	51
5.9 CONSUMO DE ENERGIA	52
5.9.1 Para o experimento com tensão de 5 volts	52
5.9.2 Para o experimento com tensão de 12 volts	53
5.9.3 Consumo de energia da chapa magnética	53
5.10 CUSTO OPERACIONAL	53
6 CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS	56
APÊNDICE	62

1 INTRODUÇÃO

A água é um dos bens naturais mais importantes para a manutenção da vida no planeta e para o equilíbrio do seu ecossistema, de tal forma que permite a manutenção e o desenvolvimento da sociedade desde tempos antigos. Segundo Cerqueira (2006), o cuidado do homem quanto à manutenção dos recursos naturais, não só da água potável, como também das florestas, do solo, dos mares e do ar, não eram vistos com tamanha preocupação, graças ao pensamento antiquado do homem, que a natureza seria capaz de reciclar-se infinitamente e fornecer os recursos necessários à vida: ar puro, terras férteis, clima ameno e, sobretudo, água potável.

Ao longo dos anos, essa preocupação se tornou cada vez mais recorrente, principalmente, com o desenvolvimento tecnológico e aumento da densidade populacional, entre outros fatores, que impactaram diretamente na diminuição de diversos recursos naturais, trazendo a tona, que o uso desenfreado e não sistemático desses recursos impactaria de forma severa não só o planeta, como a vida e o desenvolvimento dos diversos campos (SPINELLI et al., 2016, Lima, 2022). Como exemplo, tem-se a diminuição de fontes limpas de água potável, devido aos descartes constantes de efluentes não tratados ou tratados de maneira inadequada, levando-nos a considerar a água não mais um recurso inesgotável (SILVA et al., 2019, SANTOS, 2019, CERDOTES e BÜHRING, 2022). Segundo Cantelle, Lima e Borges (2018), “a escassez hídrica afeta mais de 40% das pessoas no mundo”. Segundo dados da ONU – Organização das Nações Unidas, cerca de 25 % da população mundial ainda não possui acesso à água potável (ONU BRASIL, 2022). Nascimento et al. (2014), considera que “as indústrias, em seus processos produtivos, são as maiores geradoras de efluentes. Algumas como as indústrias têxtil, de papel e celulose e petroquímica, merecem destaque pelo vultoso volume de efluentes”.

Além desses aspectos, há diversos setores de destaque em tal papel de geração de efluentes, como na indústria petrolífera, podendo caracteriza-la com uma das principais forças do desenvolvimento industrial e da sociedade, pois possui uma influência enorme no decorrer dos anos, seja para utilização como fonte de energia ou como uma fonte de geração de matéria-prima para diversos seguimentos industriais de bens e produtos (Nascimento et al., 2014). É durante os processos de extração e produção do petróleo, mais especificamente, na etapa de recuperação secundária, onde se utiliza um fluido de injeção, geralmente água, em um reservatório visando à manutenção da pressão no meio poroso, ajudando assim na recuperação e no escoamento do óleo, conseqüentemente, incrementando a produção de

efluentes. Sendo nessa etapa, uma das fontes de maior geração de resíduos líquidos no processo, que, conseqüentemente, acarreta em um grande volume de efluentes oleosos produzido, também conhecidos como água produzida de petróleo (AP) (SILVA, 2021, OLIVEIRA e GOMES, 2021).

Diante da crescente preocupação mundial com a crise hídrica que vem a pressionar principalmente o setor industrial, o grande consumidor desse recurso, se faz extremamente necessário à implementação de medidas políticas e de conscientização ambiental de forma mais assídua, assim como rigorosas ações dos órgãos responsáveis para atuar na fiscalização e legislação de descarte de efluentes, fazendo-os controlar seu uso e a qualidade desse insumo mediante as diretrizes dispostas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão responsável pela fixação de normas e padrões ambientais das atividades em volta do uso dos recursos ambientais. Como exemplo, têm-se as Resoluções nº 357/2005 que dispõe sobre a classificação dos corpos hídricos, complementada pela nº 430/2011 que dispõe sobre os padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos.

Mediante esta necessidade e rigor pela qualidade das águas, novas tecnologias e implementações em tratamentos de afluentes e efluentes surgem, como os processos de oxidação avançados (POA)(SARAVANAN et al., 2022), fotocatalise (SHAHREZAEI et al., 2012, SARAVANAN et al., 2022), oxidação de ozônio, Fenton e eletroquímica(SARAVANAN, 2022), entre outras técnicas e métodos. O tratamento por eletrofloculação (EF) ou eletrocoagulação (EC), embora não seja método novo, foi pouco explorado até meados de 2000. Segundo o estudo de Jesús Treviño-Reséndez, Medel e Meas (2021) as pesquisas desse método no tratamento de águas residuais vem crescendo desde 1990 a 2020, ganhando mais destaque no campo de pesquisa no tratamento de diversos efluentes industriais, seja na indústria do petróleo, têxtil e até de laticínios (CHEN e DO, 1993, ŞENGIL E ÖZACAR, 2006, BEMSADOK et al., 2008, PHALAKORKULE et al., 2010, TCHAMANGO et al., 2010, NASCIMENTO et. al., 2014, AKKAYA, 2022).

Segundo Safari et al. (2016), a eletrofloculação tem sido eficaz na quebra de emulsões de óleo em água e no tratamento de efluentes da indústria de papel e celulose, laticínios, aterros sanitários e efluentes oleosos da indústria de azeitonas. Paschoal (2005) já considera a eletrofloculação como uma tecnologia inovadora no processo de tratamento da água, uma vez que combina a oxidação parcial do poluente, por via eletrolítica, com processo de precipitação físico-química ou eletroquímica do lodo.

Chen e Do (1993), aplicaram o processo de EF para descoloração de soluções contendo corantes, conseguindo reduzir a cor dos efluentes testados. Chavalparit e

Ongwandee (2009) aplicaram EF para o tratamento de efluentes de biodiesel, usando um processo otimizado com um ânodo de alumínio e cátodo de grafite, com bons resultados na remoção de óleos e graxas. Nascimento et al. (2014) utilizou o tratamento em efluente oleoso sintético, produzido a base de petróleo leve, conseguindo ótimos resultados em redução de óleos e graxas. Safari et al. (2016) estudou a remoção de diesel contido em efluentes oleosos utilizando a eletrocoagulação, obtendo dados excelentes de remoção.

“A eletrocoagulação baseia-se na formação *in situ* do coagulante à medida que o ânodo de sacrifício corrói devido a uma corrente aplicada, enquanto a evolução simultânea de hidrogênio no cátodo permite a remoção do poluente por flotação” (ADHOUM e MONSER, 2004, p.1282).

O custo em volta do método baseia-se principalmente na utilização da energia elétrica e dos eletrodos usados no tratamento. Tomando como exemplo, o trabalho de Akkaya (2022), que mostrou resultados significativos com a utilização de eletrodos ecologicamente corretos, provenientes da reciclagem de sucata metálica, para o tratamento de efluentes da indústria do petróleo. Neste trabalho, será utilizado o processo via eletrofloculação ou eletrocoagulação, que é o nome dado ao tratamento realizado pelo princípio de eletrólise, com o objetivo de determinar a eficiência do tratamento aplicado, utilizando eletrodos de baixo custo produzidos de latas de alumínio recicladas, em busca de uma aplicação sustentável e da redução nos custos do tratamento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a eficiência do tratamento por via eletrofloculação utilizado eletrodos produzidos a partir de latas de alumínio recicladas, em efluente oleoso sintético, avaliando o percentual de remoção de contaminantes com relação aos parâmetros das amostras, antes e depois do tratamento por via eletrolítica com base em análises físico-químicas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o comportamento do tratamento por eletrofloculação para o efluente oleoso sintético;
- Analisar o tratamento de efluente utilizando eletrodos sustentáveis/recicláveis produzidos a partir de latas de alumínio no tratamento do efluente oleoso;
- Caracterizar o efluente tratado em termos de parâmetros físico-químicos e percentual de remoção de acordo com as seguintes análises físico-químicas: teor de óleos e graxas (TOG), alcalinidade total, cloretos, dureza total, pH, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO);
- Comparar a eficiência no tratamento de efluentes aplicando corrente contínua e variação de tensão em 5 volts e 12 volts e, comparar com dados da literatura.

3 REVISÃO DE LITERATURA

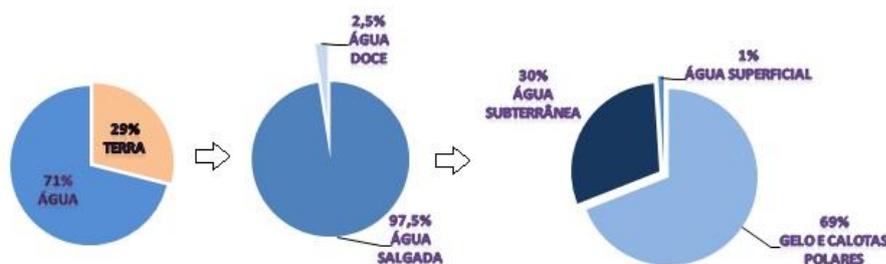
Ao longo das décadas o crescimento populacional tem aumentado exponencialmente e com ele veio também o desenvolvimento urbano, industrial e pecuário. Entretanto, problemas também estão surgindo e não é de hoje que o cuidado com a demanda de água é e deve ser abordado. Essa preocupação se deve ao aumento da demanda dos recursos hídricos mundiais para gestão e consumo da população, do setor industrial e pecuário (CANTELLE, LIMA e BORGES, 2018).

Contudo, um dos principais problemas se encontra na gestão e gerenciamento dos efluentes produzidos nos diversos setores, que por falta de tratamento ou tratamentos inadequados veem poluindo os corpos hídricos, os levando a diminuição dos recursos já escassos (CANTELLE, LIMA e BORGES, 2018, GEMINIANO, 2021). Para minimizar esses problemas diversas técnicas foram e são desenvolvidas para manutenção e tratamento de efluentes e, dentre elas está a eletrofloculação.

3.1 ÁGUA NO PLANETA

A água é o recurso mais abundante do planeta, responsável por cobrir cerca de 71 % de sua superfície. Embora pareça abundante, pouco desse grande recurso é potável (2,5%), com pode ser visto na Figura 3.1. Segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2021) estima-se que 97,5 % da água existente no mundo é salgada e não é adequada ao nosso consumo direto nem à irrigação de plantações, e 2,5 % é de água doce. Entretanto, grande parte de sua parcela (69 %) está concentrada nas geleiras, 30 % sendo de águas subterrâneas e cerca de 1 % encontra-se nos rios, lagos e fontes, águas superficiais (ANA, 2021).

Figura 3.1 - Distribuição de água no planeta



Fonte: Agência Nacional de Águas – ANA (2021)

Como podemos observar na Figura 3.1, apenas 1% da água doce encontrada na superfície, em que se pode considerá-la de fácil acesso para o uso nos diversos setores, seja para abastecimento ou desenvolvimento do setor industrial. O que mostra que o uso da água deve ser pensado e monitorado, pois o recurso passou a não mais ser visto como um recurso inesgotável, mas sim um recurso finito.

3.2 PETRÓLEO

O petróleo é um dos compostos mais importantes do desenvolvimento produtivo mundial. Responsável por vários produtos utilizados no cotidiano da humanidade seja como combustível ou matéria-prima para produção de diversos produtos industrializados. Segundo Silva e Silva Neto (2010, p.106), “o petróleo tem forte presença na sociedade de consumo do mundo, devendo-se a ser a principal fonte de energia mundial”.

3.2.1 Definição

De acordo com a American Society for Testing and Materials (ASTM), o petróleo é uma mistura de ocorrência natural, consistindo predominantemente de hidrocarbonetos e derivados orgânicos sulfurados, nitrogenados e oxigenados, a qual pode ser removida da terra. Podendo ser classificado também pelo grau de densidade API: Petróleos leves (acima de 30° API, < 0,72 g/cm³); Petróleos médios (entre 21 e 30° API) e; Petróleos pesados (abaixo de 21° API, > 0,92 g/cm³) (THOMAS et al., 2001).

Segundo Silva e Silva Neto (2010), “a palavra petróleo é de origem latina: *petra* (pedra) e *oleum* (óleo)”. Thomas et al. (2001, p.4), considera “o petróleo no estado líquido é uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com cheiro característico e cor variando entre o negro e o castanho-claro”.

O petróleo é formado a partir da degradação de matéria orgânica ao longo de milhares de anos, podendo ser encontrado em áreas marinhas e terrestres espalhado em muitos lugares ao longo do planeta. Podendo ser encontrado em variáveis profundidades no subsolo e com uma formação diferente para cada local, o que leva a consideração de que o petróleo não é uma substância homogênea, tanto em composição como em características, pois sua formação varia juntamente como o campo produtor.

Segundo Silva et al. (2022), o petróleo é uma mistura composta por centenas de compostos químicos, e separá-los em substâncias puras ou em misturas conhecidas é

praticamente impossível. Porém, é possível classifica-lo e, assim, separa-lo em frações menores, facilitando a identificação pela faixa de ebulição dos compostos.

O petróleo pode ser referenciado como uma mistura constituída em grande parte de carbono e hidrogênio, ou seja, de hidrocarbonetos. Contendo também outros compostos inorgânicos e substâncias, como o nitrogênio, enxofre e oxigênio, além de outras impurezas. Essas composições variam a depender de sua formação.

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis (2020), a composição química do petróleo é uma combinação complexa de hidrocarbonetos e outros compostos, grande parte dos reservatórios de petróleo produzem óleo com características únicas, mas que, geralmente, possuem análises elementares semelhantes, como pode ser visto no exemplo de uma amostra na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Análise elementar do óleo cru típico (% em peso)

Compostos	Percentual em peso (%)
Hidrogênio	12
Carbono	82
Nitrogênio	4
Oxigênio	1
Sais	0,5
Metais	0,5

Fonte: ANP (2020).

3.2.2 Recuperação do petróleo

A exploração do petróleo ou recuperação, como também pode ser chamada, geralmente são classificadas em etapas de recuperação, estas que podem variar em quantidade e/ou tipo usado a depender do campo, Segundo Quintela (2018), Gao et. al. (2019) e Rosa (2019), sendo elas, as etapas de Recuperação de Petróleo Convencional (Fase Primária e Secundária) e de Recuperação Avançada de Petróleo (Terciária):

- Primária – Onde o petróleo, no poço já perfurado, é obtido através da pressão natural existente no reservatório. Permitindo uma recuperação entorno de 5 ~ 10 %.
- Secundária – Fase caracterizada pela queda significativa da pressão dentro do reservatório, onde o fluxo de petróleo se torna limitado, sendo então necessária a injeção de um fluido de preenchimento, geralmente água ou gases (dióxido de carbono, nitrogênio ou gás natural) com a finalidade de tentar reestabelecer a

pressão original do poço e de ampliar a varredura, ampliando a recuperação entorno de 10 ~ 40 %.

- Terciária – É a fase caracterizada pela utilização de métodos de recuperação avançados, como o *Enhanced Oil Recovery (EOR)*, também conhecido por Recuperação Avançada de Petróleo por Métodos, que se encontram os métodos químicos que incluem a utilização de surfactantes, gases, solventes, polímeros e outras substâncias químicas capazes de alterar algumas propriedades do petróleo, facilitando sua extração. Ou o *Microbial Enhanced Oil Recovery (EOR)*, também conhecido como Recuperação avançada de Petróleo por Microorganismos, método que faz uso de microrganismos capazes de degradar hidrocarbonetos e produzirem biosurfactantes capazes de alterar as propriedades do petróleo ajudando em sua recuperação.

Sendo o petróleo uma fonte de energia essencial e indispensável dentro do cenário mundial para a geração de combustíveis e entre outros produtos, técnicas, métodos e processos foram e são desenvolvidos para aumentar sua produção. Entretanto, acarretam na geração de grandes quantidades de resíduos líquidos.

Segundo Simplício (2019), a busca crescente do aumento da produção de petróleo ao utilizar e implementar técnicas de recuperação, acarretam também no aumento da geração do efluente conhecido como água oleosa ou água produzida.

De acordo com a Resolução nº 430 de 2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que dispõe sobre as condições e os padrões de lançamentos de efluentes em corpos de água, “efluente é o termo usado para caracterizar os despejos líquidos provenientes de diversas atividades ou processos”.

3.2.3 Água produzida

A água produzida de petróleo é o efluente resultante dos processos de exploração de óleo e gás, e o principal resíduo gerado, durante as etapas de extração, transporte e refino, na indústria petrolífera (SILVA e SILVA NETO, 2010). A água é um fluido abundantemente utilizado e envolvido nos processos de extração do petróleo, podendo ser classificada quanto a sua origem. Tendo duas principais denominações, a chamada água conata, água aprisionada nas formações subterrâneas e já existentes nos reservatórios desde a sua formação e, trazida à superfície juntamente com petróleo e gás durante atividades de extração, e a água utilizada

durante os processos de recuperação suplementar, denominada de água de injeção. Logo, AP formada ao fim do processo é o resultado da mistura dessas duas fontes, a água conata e água de injeção (MOTTA et. al., 2013, SIMPLÍCIO, 2019).

“A quantidade de água produzida associada com óleo varia muito, podendo alcançar valores da ordem de 50% em volume ou até mesmo próximo de 100% ao fim da vida econômica dos poços” (THOMAS et al., 2001, p. 264).

A composição da água produzida é complexa, pois varia dependendo da sua formação, de cada poço, da matéria orgânica decomposta e de sua localização. Mesmo se tratando de uma mistura complexa, ainda é possível caracterizar de uma forma geral, como citado por Simplício (2019) a composição geral da água produzida contém compostos orgânicos, inorgânicos, bactérias, gases dissolvidos e sólidos.

Devido a grande quantidade de compostos inerentes, a água produzida em seu descarte inadequado pode acarretar grandes impactos ambientais.

Os impactos normalmente são avaliados de acordo com a toxicidade dos constituintes e a quantidade de compostos orgânicos. Óleos e graxas, por exemplo, ao entrarem em contato com o sistema aquático, formam uma barreira impedindo a entrada de oxigênio, atrapalham o ciclo biótico e levam a mortalidade de várias espécies (SILVA e SILVA NETO, 2010, p. 108).

Devido a sua composição e natureza complexa, o descarte sem o prévio tratamento adequado da água produzida, possui um grande potencial de gerar danos ao meio ambiente e a seu ecossistema dependente (SIMPLÍCIO, 2019). Sendo assim, é de suma importância à aplicação de métodos e técnicas para o tratamento e adequação, deste tipo de efluente, aos padrões pré-estabelecidos pelas normas reguladoras.

3.2.3.1 Tratamento

Os tratamentos aplicados à água produzida são de extrema importância para a redução das concentrações de diversos compostos químicos tóxicos e nocivos ao meio ambiente (BORGES, 2017).

A alternativa adotada para a destinação e/ou tratamento da água produzida depende de cada localidade e legislação imposta seja por região, estado ou país, assim como para sua localidade. Como exemplo tem-se a Resolução CONAMA nº 430/2011 (CONAMA, 2011) que limita o descarte de efluentes com concentração de óleos e graxas, para óleos minerais de

até 20 mg/L e para óleos vegetais e gorduras animais de até 50 mg/L e, a Resolução CONAMA 393/2007, que dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, e dá outras providências, que complementa a Resolução 357/05, estabelece que o descarte de água produzida deve obedecer a concentração média aritmética simples mensal de óleos e graxas de até 29 mg/L, com valor máximo diário de 42 mg/L.

Segundo Motta et al. (2013), o tipo de processo a ser adotado para o tratamento da água produzida depende do destino final do efluente tratado, seja para reuso como fluido de injeção, irrigação ou mesmo para descarte, assim como a escolha dos compostos que devem ser removidos.

As opções de tratamentos desenvolvidos e aplicados à AP até o momento englobam os métodos físicos, químicos, sistemas de membranas, biológicos e eletroquímicos (Silva, 2021). É possível comparar alguns processos de tratamento, como mostrados no Quadro 3.1, quanto ao princípio operacional, uso de produtos químicos, por aplicação em localidade (*Onshore* e/ou *Offshore*) e suas vantagens e desvantagens.

Quadro 3.1 – Comparação entre processos de tratamento da água produzida

	Hidrociclones	Flotadores	Membrana	Biológico
Princípio de operação	Separação gravitacional	Flotação natural ou a ar/gás	Filtração	Microrganismos aeróbicos e anaeróbicos
Vantagem	Elevada capacidade de processamento; Compactabilidade; Baixo consumo de energia.	Remoção de partículas em suspensões de baixa densidade da fase dispersa.	Seletividade de substância	Remoção de compostos orgânicos e amônia.
Desvantagem	Incrustações, erosão e bloqueio de porta de rejeito por areia e/ou outras partículas.	Baixa eficiência na remoção de sais e metais; Necessidade de uso substâncias químicas e precedidas de etapas de coagulação/floculação; Geração de lodo.	<i>Fouling</i> ; Limpeza química.	Ineficazes no tratamento de sólidos dissolvidos.
Aplicabilidade em instalações	<i>Offshore</i>	<i>Onshore</i> e <i>Offshore</i>	<i>Onshore</i> e <i>Offshore</i>	<i>Onshore</i>

Fonte: Motta et al. (2013); Vaneli (2014); Barros e Guimarães (2015); Borges (2017); Beleli (2019).

Durante o processo de escoamento dos fluidos presentes no reservatório de petróleo, a água, o petróleo e o gás natural ascendem em diferentes padrões, o que geralmente auxilia

na formação de emulsões e dissolução de gases nas fases líquida. Logo, ao chegar, à superfície se faz necessário separar os fluidos da mistura, geralmente empregando a primeira etapa de tratamento, também conhecida como tratamento primário, composta por um sistema de separação trifásico. Esse sistema é responsável pela separação inicial do gás natural, petróleo e água, pela diferença de densidade. O gás natural sai pelo topo do tanque, para um tratamento posterior em coluna de absorção; o petróleo, passa para o tanque de tratamento eletrostático; e a água, sai direto para o descarte. Entretanto, a concentração final de saída do tanque trifásico, geralmente, possui altas concentrações chegando, a 2000 ppm, concentrações muito maiores das requeridas pela legislação, assim se faz necessário a implementação de tratamentos sequenciais para água, em que o mais comum é o tratamento por hidrociclones e flotores, para redução da concentração de acordo com os níveis exigidos pelos órgãos de regulamentação (MENDES, 2012).

Embora os métodos físico-químicos pareçam ser eficazes na remoção de óleos e graxas de águas residuais oleosas, eles exigem o manuseio de produtos químicos e suas operações são relativamente complicadas (CHAVALPARIT E ONGWANDEE, 2009, p. 1492).

3.3 ELETROFLOCULAÇÃO

O processo da eletrofloculação, também chamado de eletrocoagulação ou eletroflotação, é um processo eletrolítico que envolve a geração de coagulantes *in situ* a partir da utilização de ânodos de ferro e/ou alumínio, pela ação de corrente elétrica aplicada nos eletrodos, promovendo a desestabilização de poluentes emulsificados, ou em suspensão, em meio aquoso (CERQUEIRA, MARQUES e RUSSO, 2011; NETO et. al., 2011).

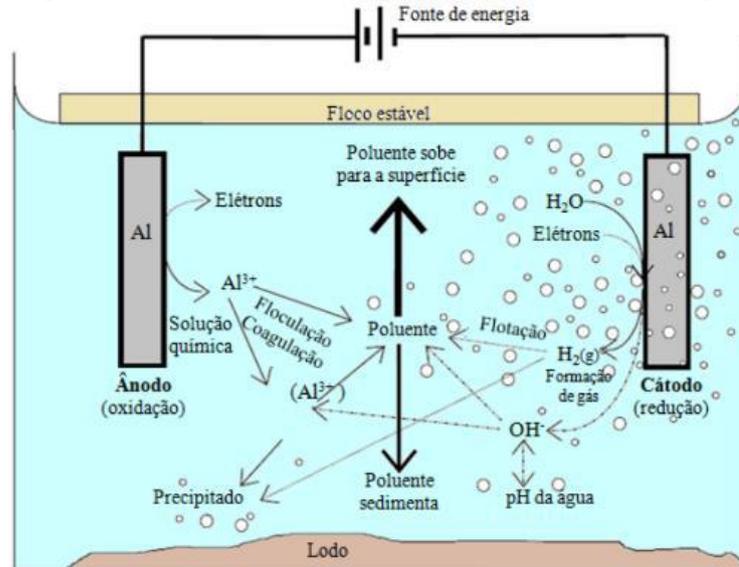
3.3.1 Mecanismo do processo

A eletrofloculação resume-se na utilização de eletrodos de sacrifício (Figura 3.2) sob aplicação de um potencial elétrico em um efluente, promovendo, então, a produção de um coagulante *in situ*, responsável pela remoção de poluentes.

Segundo Adhoum e Monser (2004), a aplicação da tensão, sobre um eletrodo de material anódico apropriado, gera por oxidação eletrolítica o coagulante *in situ*, em pH apropriado, formando hidróxidos metálicos insolúveis que são capazes de remover poluentes por complexação superficial ou atração eletrostática.

Segundo Chen e Do (1994) dentre as características desse método, a eletrocoagulação faz uso de equipamentos simples, de fácil operação, curto período de retenção reativa, utiliza-se de poucos equipamentos, sem necessidade de adição de produtos químicos, além de geração de lodo reduzido.

Figura 3.2 – Mecanismo do processo de eletrofloculação

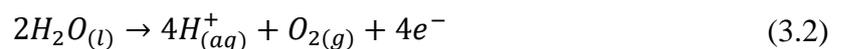


Fonte: Holt et al. (2002)

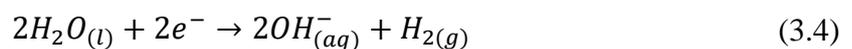
Segundo Neto et. al. (2011), o processo ocorre em três etapas:

1. O coagulante é gerado *in situ* devido à oxidação de um ânodo metálico (M) (Equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4) de sacrifício, onde os respectivos cátions são gerados na fase anódica. Estes reagem com moléculas de água para formação dos respectivos hidróxidos e poli-hidróxidos:

Ânodo:

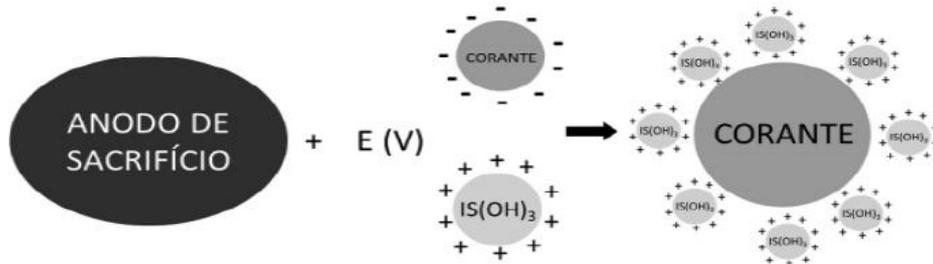


Cátodo:



2. Os hidróxidos formados a partir das reações decorrentes da oxidação do ânodo realizam um processo de adsorção, aglutinando as partículas coloidais e de contaminantes dispersos formando flóculos (Figura 3.3), que são responsáveis pela retirada das impurezas. Esta remoção pode ocorrer tanto por complexação como por atração eletrostática e, posterior, coagulação.

Figura 3.3 - Processo de formação de flóculos

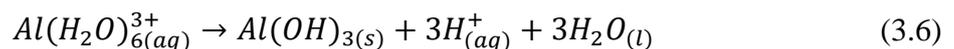


Obs.: IS – íon de sacrifício: $Al(OH)_3$
 Fonte: Neto et al. (2011).

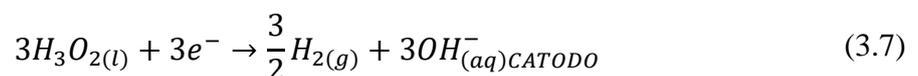
3. Flotação dos flóculos e impurezas, simultaneamente à formação do coagulante, a eletrólise da água gera microbolhas de oxigênio e hidrogênio durante a quebra das moléculas de água, conseqüentemente as microbolhas são responsáveis por carregar o material floculado para a superfície.

3.3.2 Eletrodo de alumínio

Quando se utiliza eletrodo de alumínio no processo de eletrofloculação, a oxidação (Equação 3.5) no anodo de sacrifício gera íons Al^{3+} , que reagirá pela hidrólise (Equação 3.6) na formação do principal agente de floculação o $Al(OH)_3$, hidróxido de alumínio.



Segundo Cerqueira et. al. (2011), “além da formação do agente coagulante, a eletrofloculação pode gerar microbolhas de gases (eq. 3.7) que são responsáveis pela flotação de óleos, graxas e outros compostos particulados”.



Segundo Cerqueira et al. (2011, p. 60), “o pH ideal para a formação do agente floculante, $\text{Al}(\text{OH})_3$, está entre 6,5 e 7,0”. Enquanto Santin (2018) informa que trabalhar fora da faixa de pH ideal pode-se formar compostos iônicos não desejados para o processo, como $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ e $\text{Al}(\text{OH})^{4-}$, que são compostos solúveis e não formadores de flocos.

Como apontado, em efluentes que possuem em sua composição íons de cloreto, podem gerar reações secundárias durante a eletrólise devido à oxidação do cloro, gerando o gás cloro que porventura pode gerar íons hipocloritos em meio alcalino, que podem agir como agente desinfetante (CERQUEIRA et al., 2011).

3.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ELETROFLOCULAÇÃO

O processo de tratamento eletrolítico apresenta pontos positivos e negativos em comparação com outros sistemas tradicionais. Segundo Mollah et al. (2001) e Fleck et. al. (2013), as principais vantagens da técnica de eletrofloculação frente às técnicas tradicionais de tratamento de efluentes industriais, são:

3.4.1 Vantagens

- a. Requer equipamentos simples e de fácil operação;
- b. Aplicação de corrente e tensão que podem ser medidas e controladas de maneira automatizada;
- c. Maior controle na liberação do agente coagulante, em comparação com os processos físico-químicos convencionais;
- d. Limitação o uso de substâncias químicas, diminuindo o impacto causado por xenobióticos no ambiente natural;
- e. As bolhas de gás produzidas durante a eletrólise levam o contaminante ao topo do reator, onde pode ser facilmente removido;
- f. A célula eletrolítica é eletricamente controlada, não necessitando de dispositivos adicionais, o que requer menos manutenção;
- g. Efluentes tratados por eletrofloculação apresentam menor teor de sólidos totais dissolvidos comparados com tratamentos químicos;
- h. Tem a vantagem de remover as menores partículas coloidais, graças ao campo elétrico aplicado que as coloca em movimento mais rápido, facilitando a coagulação.

- i. Uma das maiores vantagens da eletrofloculação é a remoção de óleos e graxas, devido à facilidade de coagulação e flotação das moléculas desses compostos. Com consequências da interação dessas moléculas com hidróxido de alumínio, formam-se coloides com densidade inferior à densidade da água, e estes deslocam naturalmente para a superfície do líquido.

3.4.2 Desvantagens

- a. Os eletrodos precisam ser substituídos regularmente, caso sofram passivação ou desgaste;
- b. O consumo de energia elétrica pode ser dispendioso em algumas regiões;
- c. Um filme de óxido impermeável pode ser formado no cátodo, conduzindo a perda de eficiência da unidade;
- d. Requer alta condutividade do efluente;
- e. Hidróxidos gelatinosos podem tender a solubilizar em alguns casos.

Vieira et al. (2017, p. 206) afirma que “o processo de eletrofloculação é economicamente inviável, mediante a utilização da energia elétrica convencional para o fornecimento de energia para o sistema”. Porém, pode vir a se tornar viável ao se utilizar de fonte de energia renovável, como energia solar fotovoltaica.

Levando em consideração as vantagens e desvantagens, o desenvolvimento de eletrodos sustentáveis e análises econômicas em processos podem ajudar a entender e direcionar o uso desse método em processos produtivos.

3.5 MATERIAIS RECICLADOS NO PROCESSO DE ELETROFLOCULAÇÃO

A utilização de eletrodos é fundamental para que o processo de eletrofloculação ocorra, sendo assim, de suma importância a escolha de seu material. Sua escolha deve englobar os principais pontos: que os materiais apresentem preços mais baixos e alta eficiência, como os mais comumente utilizados, alumínio (Al) e ferro (Fe). A possibilidade de utilizar materiais recicláveis para fabricação de eletrodos para o processo ainda não foi muito explorada, tendo poucos trabalhos que apresentem um foco nesse aspecto, o trabalho de Akkaya (2022) apresenta a utilização de eletrodos fabricados a partir da reciclagem de sucata de ferro e alumínio na fabricação de seus eletrodos compostos, para o tratamento de efluente

oleoso, oriundo do processo petrolífero, apresentando resultados significativos na remoção dos teores de óleos e graxas, turbidez, DQO e outros parâmetros. Trazendo, também, uma nova perspectiva para pesquisa nesse campo.

A importância do estudo na produção de eletrodos recicláveis pode abordar um sistema mais sustentável e viabilizar a redução do custo atrelado aos eletrodos no processo. Por fim, tornando elementos que poderiam estar sendo descartados, como lixo, em recursos importantes para o processo.

3.6 ESTADO DA ARTE

A eletrofloculação não é um método de tratamento de águas residuais novo, mas vem recebendo destaque no campo de pesquisa de tratamento de efluentes, por volta do ano 2000, em vários segmentos, desde o tratamento de efluentes petroquímicos, têxtil, papel e celulose, laticínios e entre outros campos. Adiante, será abordado um pouco da aplicação da técnica, especialmente em tratamento de águas residuais.

Chen e Do (1993) utilizaram a técnica de eletrofloculação para o tratamento e remoção de cor em soluções contendo corantes reativos e dispersos, realizando um comparativo na utilização de eletrodos de ferro e alumínio. O estudo apresentou bons resultados de remoção de cor, com as amostras contendo corantes reativos com melhores reduções para a utilização de eletrodos de ferro em seu tratamento, enquanto os efluentes com corante disperso apresentaram uma remoção mais eficiente, quando usando eletrodos de alumínio em seu tratamento.

Chacalparit e Ongwandee (2009) abordaram a utilização da eletrocoagulação, também chamada de eletrofloculação, para o tratamento de águas residuais oriundos da produção de biodiesel. Foram utilizados eletrodos compostos, com ânodos de alumínio e cátodos de grafite, em formato de placas planas e retangulares colocadas em paralelo, que se mostraram eficazes na redução de óleos e graxas e de sólidos suspensos, com reduções acima de 95 %, afirmando que o processo por eletrocoagulação é adequado para um tratamento primário de efluentes de biodiesel.

Nascimento et al. (2014) aplicaram o tratamento por eletrofloculação em efluente oleoso sintético, este produzido a base de petróleo leve, utilizando eletrodos de alumínio configurados em três diferentes tamanhos, com ótimos resultados na redução de óleos e graxas em torno de 80 %.

Safari et al. (2016) estudaram a aplicação da eletrocoagulação em efluentes oleosos para remoção de diesel e demanda química de oxigênio (DQO), usando eletrodos de alumínio e ferro, sob diferentes parâmetros de pH, tempo, voltagem e concentração de diesel. Foram obtidos excelentes percentuais de remoção diesel de 98,8 % e de DQO de 99,1 %.

Akkaya (2022) investigou a aplicação da eletrofloculação utilizando eletrodos produzidos a partir de sucata com uma configuração composta, utilizando alumínio e ferro, para remoção da DQO e fenol de águas residuais de petróleo. Os eletrodos foram produzidos tendo seu ânodo feito de ferro em formato cilíndrico e perfurado, enquanto os cátodos utilizados foram produzidos sob a forma de placas de alumínio e ferro. Remoções de 96,18 % para DQO e 94,02 % para remoção de fenol foram obtidas, mostrando que o processo de eletrocoagulação é um método de tratamento eficaz para remoção de DQO e fenol utilizando eletrodos reciclados.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Apresentam-se, neste capítulo, a metodologia empregada para identificar as características e propriedades do efluente oleoso sintético, gerado para simular um efluente da indústria petroquímica, utilizando-se da eletrofloculação no processo de remoção do teor de óleos e graxas, alcalinidade total, cloretos, dureza total, pH, turbidez e DQO.

Para fins de avaliação da eficiência do processo de eletrofloculação no tratamento da água produzida, serão realizadas análises no efluente bruto e nos efluentes pós-tratamento. O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia Química do Centro Universitário da UNIFAVIP/WYDEN.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Água produzida sintética

O efluente estudado neste trabalho foi produzido em laboratório, sendo assim um efluente sintético, devido à inacessibilidade de água produzida. O efluente foi produzido baseado no trabalho de Maiti et. al. (2011) utilizando-se dos seguintes materiais:

- Água de abastecimento da Universidade (Torneira);
- Diesel S-10, utilizado como hidrocarboneto substituto ao petróleo, por ser um dos seus derivados;
- Éter Lauril Sulfato de Sódio, como agente emulsificante;
- Cloreto de Sódio (Sal comercial), NaCl, responsável pela salinidade da água;

O efluente de trabalho foi preparado levando em conta às proporções em porcentagem de massa por volume trabalhado. Preparando 10 L de efluente em processo de batelada, utilizou-se 0,2% de Diesel S-10, 2% de NaCl e 0,001% de Éter Lauril Sulfato de Sódio.

O processo mecânico de mistura foi realizado utilizando um agitador mecânico, sobre rotação de 800 rpm, durante de 8 horas.

4.2 EQUIPAMENTOS

4.2.1 Reator eletrolítico

O reator eletrolítico de vidro (Figura 4.1) utilizado nos experimentos foi construído utilizando vidro temperado com dimensões de 15 cm de largura, 15 cm de comprimento e 25 cm de altura, totalizando uma capacidade de trabalho de 5.625 cm³ ou 5,625 L.

Figura 4.1 – Reator de vidro



4.2.2 Fonte geradora de energia

Este equipamento foi responsável por promover a energia necessária para iniciar os processos de eletrofloculação, gerando a corrente de energia que circulará o processo e permitirá, através do processo de oxidação do eletrodo de sacrifício, a geração do agente coagulante no sistema. A fonte utilizada foi cedida pela UNIFAVIP, para fins de estudo (Figura 4.2).

Figura 4.2 – Fonte geradora



A fonte utilizada nos processos possui potenciais de saída de tensão variando de 0 à 12 volts e trabalha a corrente contínua de 1,5 ampères.

As tensões empregadas para realização dos experimentos foram as de 5 volts e 12 volts, com corrente aplicada de 1,5 ampères para ambos os tratamentos, ocorrendo sempre em corrente contínua. A escolha das tensões trabalhadas foram adotadas com base na revisão feita na literatura, adotando então tensões pontuais para os testes.

4.2.3 Eletrodos

Os eletrodos utilizados no estudo foram produzidos mediante a reciclagem de latinhas de alumínio, Figura 4.3, obtidas de doação em um restaurante em Caruaru-PE.

Figura 4.3 – Latinha utilizada



Para sua produção, foram utilizadas 5 latinhas, que foram submetidas aos seguintes processos de tratamento:

- Lixamento: Após a obtenção, as latas foram submetidas a um processo mecânico e manual de lixamento, para retirada da camada protetora externa de tinta;
- Lavagem: Após o processo de lixamento as latinhas foram submetidas à lavagem com água e detergente, para retirada de resíduos contaminantes presentes;
- Corte: O corte das placas foi realizado manualmente com o auxílio de tesoura;
- Lavagem: Novamente, os eletrodos passaram por uma lavagem com detergente para garantir sua limpeza e isenção de materiais residuais.

Com as latinhas devidamente limpas e sem revestimento de tintas, foram produzidos 8 eletrodos de alumínio, como pode ser visualizado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Eletrodo pós-tratamento físico



A escolha do material para produção do eletrodo e utilização foi adotada para abordar um sistema mais sustentável e econômico, viabilizando a transformação de um resíduo em um importante elemento do processo. Além de investigar e descobrir a eficiência do mesmo no processo de eletrofloculação.

Os eletrodos utilizados no estudo foram devidamente medidos e pesados (Tabela 4.1) antes e após o processo, para quantificar a variação de massa ocorrida durante a eletrofloculação.

Tabela 4.1 – Dimensões e massa dos eletrodos

Eletrodos	Dimensões (cm x cm)	Massa inicial (g)
E1	12,5 x 6,0	1,7012
E2	12,5 x 6,0	1,7015
E3	12,6 x 6,2	1,7101
E4	12,5 x 6,0	1,7009
E5	12,5 x 6,2	1,7060
E6	12,5 x 6,1	1,7032
E7	12,6 x 6,2	1,7112
E8	12,5 x 6,0	1,7013

Nota: as dimensões foram medidas utilizando uma régua, e aproximações foram feitas devido ao corte dos eletrodos.

Em que:

E “n° - número ímpar” – Eletrodo utilizado no polo anódico;

E “n° - número par” – Eletrodo utilizado no polo catódico.

4.2.4 Chapa magnética

Para realização da agitação no processo de tratamento, foi utilizada uma chapa magnética, responsável por promover a agitação no sistema, Figura 4.5.

Figura 4.5 – Chapa aquecedora e magnética



4.3 TÉCNICA APLICADA

As tensões e o tempo de trabalho empregadas no trabalho foram estipulados com base nos trabalhos dos autores Chen e Do (1994), Chavalparit e Ongwandee (2009), Maiti (2011), Nascimento et al. (2014) e Akkaya (2022), adaptando-os ao estudo.

A técnica empregada no tratamento eletrolítico de efluentes consiste na utilização da passagem de uma corrente elétrica gerada por uma célula eletrolítica, Figura 4.6, constituída de uma fonte geradora de corrente contínua com voltagens de 5 volts e 12 volts, utilizando-se de dois pares de eletrodos de alumínio, por tratamento. Estes que serão imersos no efluente a uma distância fixa um do outro e serão os responsáveis por permitir a passagem da corrente elétrica pelo fluido. Esta corrente irá gerar um campo elétrico favorecendo a eletrofloculação e eletroflotação das partículas coloidais dispersas no fluido a ser tratado.

Os experimentos foram realizados a temperatura ambiente (24 °C), volume de efluente de 2,5 L, para cada voltagem trabalhada, tempo de imersão de 30 minutos sob corrente contínua. Posteriormente, a agitação foi finalizada e aguardou-se 5 minutos para permitir o deslocamento dos flocos dispersos no efluente tratado, seguindo com a retirada do efluente por acionamento manual da válvula de escape na parte inferior do reator.

O processo foi realizado em ambiente controlado, com reator de vidro aberto evitando o acúmulo de gases liberados durante o processo de tratamento, que estão em sua maioria sob liberação de gás oxigênio (O₂) e hidrogênio (H₂), evitando qualquer problema durante os experimentos.

Figura 4.6 – Esquema de montagem do sistema



4.4 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

As análises físico-químicas das amostras dos efluentes bruto e pós-tratamento foram realizadas com base nos parâmetros estabelecidos pela resolução CONAMA nº 430 de 2011, para padrões de lançamento de efluentes, nº 393/2007, que dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, e da outras providências, e, nº 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para seu enquadramento, bem como estabelece condições e padrões de lançamento de efluentes, Quadro 4.1, assim com também foram adotados parâmetros adicionais apontados pela literatura como bons indicadores de eficiência de tratamentos de efluentes.

Quadro 4.1 – Padrões de lançamento de efluentes CONAMA nº 357/05, nº 393/07 e nº 430/11

Parâmetros	357/05 – água doce (Classe 3)	393/2007	430/2011
pH	6-9	5-9	5-9
Óleos e graxa	Visualmente ausentes	Média aritmética mensal de até 29 mg/L ou valor máximo diário de 42 mg/L (para plataformas marítimas)	< 20 mg/L óleos minerais; < 50 mg/L óleos vegetais e gorduras animais.
Cloretos	250 mg de Cl/L	-	-
Turbidez	Até 100 UNT	-	-

Fonte: CONAMA nº 357/05; nº 393/2007; nº 430/2011.

Para caracterização de algumas das análises das amostras, tomou-se como modelo o Manual Prático de Análise de Água da FUNASA, 2006.

Todas as análises, exceto as de pH, Turbidez, TOG e DQO, foram realizadas em triplicata para obtenção de dados mais precisos e coerentes, para realização da eficiência de remoção dos compostos estudados.

4.4.1 Teor de óleos e graxas (TOG)

Para determinação da concentração do teor de óleo e graxas (TOG), foi escolhido o método de espectrofotometria de absorção molecular. Essa escolha foi baseada na disposição dos equipamentos e reagentes disponíveis no laboratório da universidade. Sob tal situação, foi utilizado o hexano como solvente, este com a função de extrair a parte oleosa contida nas amostras, e construir uma curva de calibração para calcular a concentração contida nas amostras através da leitura da absorbância.

O espectrofotômetro UV-Visível utilizado foi da marca BEL, modelo UV-M51 (Figura 4.7), com faixa de comprimento de onda de 190 nm a 1.000 nm.

Figura 4.7 – Espectrofotômetro BEL



A curva de calibração para determinação do teor de óleos e graxas, assim como o procedimento da técnica de extração e a equação para calcular a concentração do TOG que se encontram nos **APÊNDICES A e B**.

4.4.2 Determinação da alcalinidade

A dureza da água está relacionada à quantidade de íons de Ca^+ e Mg^{2+} presentes. Segundo Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas – APDA (APDA, 2012), a Organização Mundial de Saúde classifica a dureza segundo os dados apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Classificação quanto à concentração da dureza total

Classificação	Concentração (mg de CaCO ₃ /L)
Muito dura	Maiores que 180
Dura	120 – 180
Moderadamente dura	60 – 120
Macia	Menores que 60

Fonte: APDA (2012)

A alcalinidade é dada pela somatória das diferentes formas de alcalinidade existentes, ou seja, a concentração de hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos, expressa em termos de carbonato de cálcio, de acordo com o Método de determinação do Manual Prático de Análise de Água da FUNASA, 2006 – Titulação com ácido sulfúrico.

4.4.3 Determinação de cloretos

Os teores de cloretos estão presentes em águas naturais e residuais, sob a forma de íon cloreto (Cl⁻), como um dos principais ânions inorgânicos, que podem variar de pequenos traços até centenas de mg/L, sendo essenciais para o metabolismo humano em pequenas quantidades ou quando em grande quantidade, um importante parâmetro de indicação de poluição e/ou mineralização da água. O Método utilizado para a determinação do teor de cloretos (Titulação com nitrato de prata) foi do Manual Prático de Análise de Água da FUNASA, 2006.

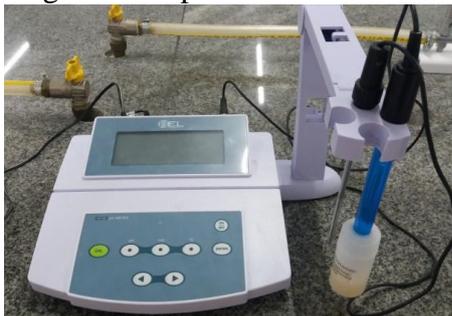
4.4.4 Determinação da dureza total

É calculada como sendo a soma das concentrações de íons cálcio e magnésio na água, expressos como carbonato de cálcio, de acordo com o Método de determinação do Manual Prático de Análise de Água da FUNASA, 2006 – Titulação com EDTA.

4.4.5 Determinação do pH

Representa a concentração de íons hidrogênio em uma solução, de acordo com o Método de determinação – Leitura em Potenciômetro. O potenciômetro utilizado para leitura do pH foi um pHmetro de bancada BEL (Figura 4.8), modelo PHS3WB com braço articulado, precisão 0,01 e faixa de pH 0 – 14.

Figura 4.8 – pHmetro de bancada



4.4.6 Determinação de turbidez

Foi realizada devida à presença de materiais sólidos em suspensão, que reduzem a sua transparência, de acordo com o Método de determinação – Nefelométrico. Utilizou-se um turbidímetro digital da ASKO (Figura 4.9), modelo TU430 com faixa de medição de 0 a 1.000 NTU.

Figura 4.9 – Turbidímetro TU430



4.4.7 Demanda química de oxigênio (DQO)

Está relacionada à quantidade de oxigênio dissolvido e que pode por em ação o processo de quimicamente oxidar a matéria orgânica presente no meio, de acordo com o Método de determinação – SMWW, 23ª edição, Método 5220. Esta análise foi realizada em um laboratório privado, BIOTECH Laboratório de Análises Ambientais, Alimentos e Água, devido à falta de equipamentos e reagentes para realização.

4.4.8 Análise dos eletrodos

Para avaliar o ganho e a perda de massa dos eletrodos, foi utilizada a técnica de pesagem a seco (balanço de massa) utilizando-se de uma balança analítica da marca BEL (Figura 4.10), modelo M214AIH, com precisão de 0,0001 g, com calibração automática.

Figura 4.10 – Balança analítica BEL



4.4.9 Consumo de energia

A potência consumida nos processos é calculada através da Lei de Ohm, de acordo com a Equação 4.1.

$$P = V \cdot I \quad (4.1)$$

Em que:

P – Potência do reator (W);

V – Tensão elétrica (V);

I – Corrente elétrica (A).

Com o valor da potência do reator, é possível calcular o consumo de energia elétrica, segundo apresentado por Santin (2018) de acordo com a Equação 4.2.

$$C_{energia} = \frac{P \cdot t}{V_l} \quad (4.2)$$

Em que:

$C_{energia}$ – Consumo de energia (W.h/m³);

P – Potência consumida (W);

t – Tempo de aplicação da corrente (h);

V_1 – Volume tratado (m^3).

O consumo de energia da chapa magnética durante o processo pode ser calculada de acordo com a Equação 4.3.

$$C_{energia} = P \cdot t \quad (4.3)$$

Em que:

$C_{energia}$ – Consumo de energia ($W.h/m^3$);

P – Potência consumida (W);

t – Tempo de aplicação da corrente (h).

4.4.10 Custo operacional

O custo envolvendo o processo de eletrofloculação depende, principalmente, dos custos de energia elétrica e dos eletrodos. Esse custo operacional para o tratamento é uma variável importante para o estabelecimento de uma planta real (Akkaya, 2022).

O custo operacional (Equação 4.5) para o experimento foi estimado ao utilizar o consumo de energia elétrica total (Equação 4.4).

$$C_{Total} = C_{EE} + C_{EC} \quad (4.4)$$

Em que:

C_{Total} – Energia total consumida durante o processo de eletrofloculação ($kW.h$);

C_{EE} – Consumo de energia do reator ($kW.h/m^3$);

C_{EC} – Consumo de energia da chapa magnética ($kW.h/batelada$);

$$C_o = C_{Total} \cdot a \quad (4.5)$$

Em que:

C_o – Custo operacional ($R\$/m^3$);

a – custo do $kW.h$.

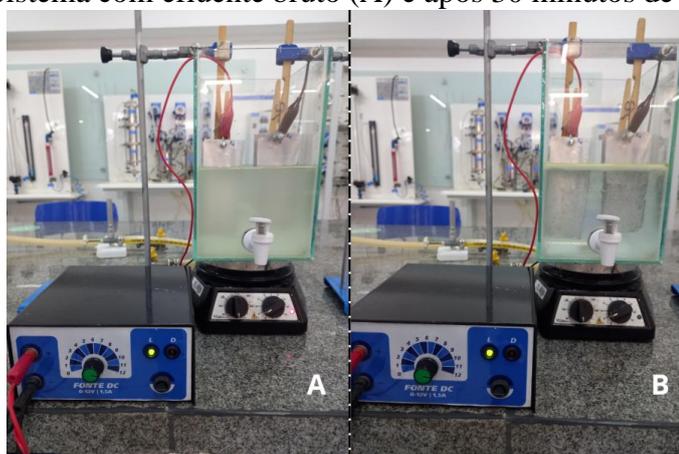
O custo dos eletrodos não foi considerado, visto que foram produzidos a partir de latas de alumínio recicladas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta secção, são apresentados os resultados obtidos dos experimentos realizados assim como a comparação entre as tensões aplicadas, com o intuito de avaliar a efetividade do tratamento.

Os tratamentos foram desenvolvidos conforme o estabelecido na metodologia do trabalho. A Figura 5.1 demonstra dois estágios do sistema, onde A seria a condição inicial do processo e B após a aplicação do tratamento via eletrofloculação, apresentando a diferença no aspecto visual em relação ao efluente bruto e o efluente tratado.

Figura 5.1 – Sistema com efluente bruto (A) e após 30 minutos de tratamento (B)



Após os procedimentos experimentais, foram obtidos os dados mediante as análises físico-químicas realizadas possibilitando, assim, determinar a eficiência da remoção dos contaminantes, sendo válido ressaltar que foram realizadas análises não somente no efluente tratado, como também no efluente bruto. Os dados obtidos podem ser visualizados no Quadro 5.1 e explicados separadamente, posteriormente.

Quadro 5.1 – Resumo das análises de caracterização das amostras

	Amostra	TOG	Alcal.	Clor.	Durez.	pH	Turbz.	Temp	DQO
Efluente	Bruto	378,6	26,67 ± 0,057	1364,58 ± 0,010	17,92 ± 0,057	7,1	262	24	3.268,90
Efluente Tratado	5 volts	6,6	23,33 ± 0,057	1329,59 ± 0,001	15,36 ± 0,001	7,17	41,1	25	1.995,09
	12 volts	0,6	22 ± 0,001	1301,26 ± 0,057	16,64 ± 0,057	7,27	0,41	25	1.479,38

TOG – Teor de óleos e graxas (mg/L); Alcal. – Alcalinidade total (mg/L de CaCO₃); Clor. – Cloretos (mg/L de Cl); Durez. – Dureza total (mg/L de CaCO₃); pH – Potencial hidrogênio iônico (); Turbz. – Turbidez (NTU) Temp. – Temperatura (°C); DQO – Demanda química de oxigênio (mg/L).

Para todos os parâmetros estudados, observa-se que houve uma redução nos valores dos parâmetros estudados, com uma redução maior para o TOG e para a turbidez. Nos tópicos a seguir discutiremos mais cada uma das análises realizadas.

5.1 TEOR DE ÓLEOS E GRAXAS (TOG)

O teor de óleos e graxas (TOG) é um dos principais parâmetros envolvendo a qualidade dos efluentes de água produzida e diversas águas residuais oleosas. Nesta seção, serão apresentados os dados para eficiência em sua remoção.

5.1.1 Análise do TOG

Os resultados de TOG estão apresentados na Tabela 5.1, e foram determinados conforme os APÊNDICES A e B, observa-se uma redução do teor de óleos e graxas acima dos 98%.

Tabela 5.1 – Eficiência da remoção do teor de óleos e graxas

Amostra	Absorbância	Concentração (ppm)	Eficiência (%)
Bruta	0,078	378,6	-
5 volts	0,016	6,6	98,26
12 volts	0,015	0,6	99,84

Em Safari et. al. (2016), foram consideradas águas residuais contaminadas por diesel, como contaminante oleoso, redução de 98,8 % nos teores de óleos e graxas, utilizando uma voltagem de 10,5 volts. Comparativamente, tem-se resultados similares aos dados encontrados nesta pesquisa, com o tratamento a 5 volts apresentando remoção de 98,26 % e 12 volts com remoção de 99,84 %, de acordo com os dados encontrados na literatura.

Chavalparit e Ongwandee (2009) também obtiveram resultados similares em relação à remoção do teor de óleos e graxas, utilizando um ânodo de alumínio e um cátodo de grafite, e conseguiram remoção de 95 %. Ressaltar-se, que, eles trabalharam com águas residuais de biodiesel, que contavam com um teor mais significativo de glicerol e metanol.

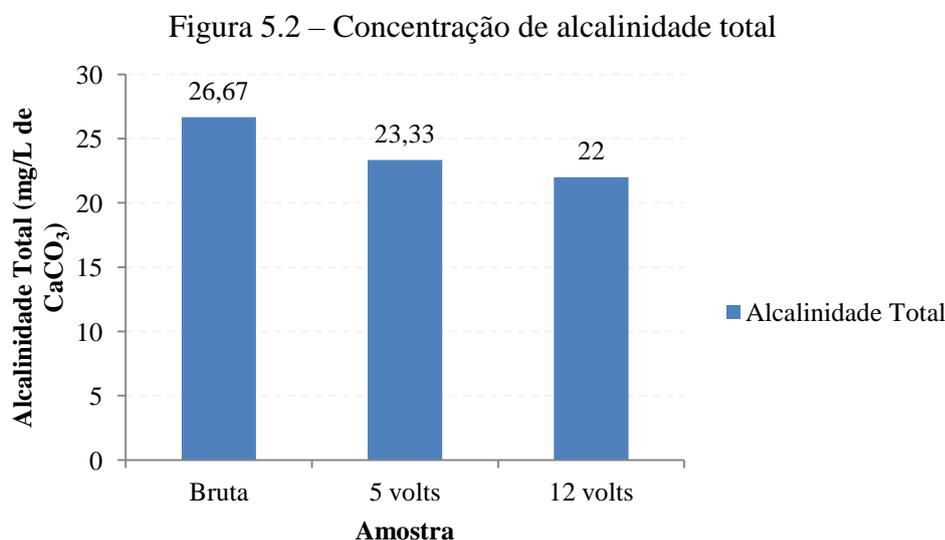
Akkaya (2022), em seu trabalho utilizando eletrofloculação para o tratamento de água residual de petróleo, conseguiu remoção de 94,02 % utilizando densidade de corrente de 22 mA/cm², em tratamento de 39 minutos.

As concentrações encontradas de TOG, para os processos de tratamento de 5 volts e 12 volts, estão de acordo com os limites estabelecidos pelo CONAMA.

5.2 ALCALINIDADE TOTAL

Conforme os dados obtidos, observa-se um resultado de redução da alcalinidade abaixo de 18%.

Dentre os percentuais encontrados, verifica-se que a redução da alcalinidade total do sistema é mais suscetível à melhora quando aplicado a uma tensão mais elevada, como consta na Figura 5.2.



Nota: eficiência de remoção de 12,50 % para amostra tratada a 5 volts e 17,50 % para amostra tratada a 12 volts.

A alcalinidade é um dos parâmetros que não são limitados pelas normas ambientais reguladoras, para lançamentos de efluentes ou para as normas estabelecidas para águas doces, resolução CONAMA 357/2005 (CONAMA, 2005).

Entretanto, é de suma importância, segundo COELHO et al. (2015), pois está relacionado diretamente ao grau de decomposição da matéria orgânica e, conseqüentemente, a liberação de CO₂ do meio, que pode apresentar interferência diretamente na quantidade de oxigênio dissolvido no meio, vindo a ocasionar um desequilíbrio no ambiente. Dessa forma, trazendo uma mudança no ambiente aquático e na vida ali presente.

Segundo Neto (2013), a principal fonte de alcalinidade encontrada em águas naturais é decorrente da descarga de efluentes industriais, onde se empregam bases fortes como soda cáustica e cal hidratada.

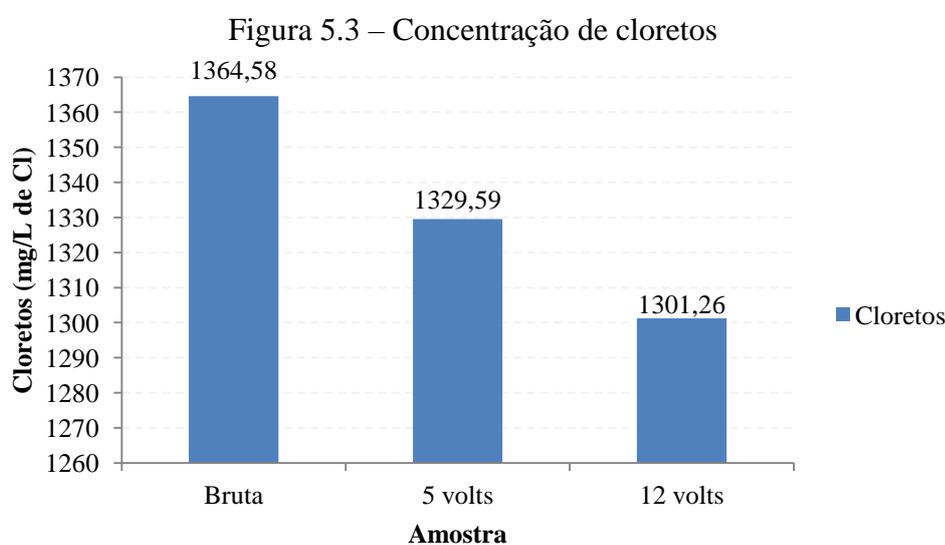
A alcalinidade em águas de abastecimento público se torna um fator de fundamental importância por auxiliar na floculação do efluente, devido ao fenômeno conhecido por floculação de varredura. Entretanto, em quantidades elevada, se faz necessário adicionar mais água ao efluente, até que a redução do teor da alcalinidade diminua o suficiente para reagir com os agentes floculantes, como o sulfato de alumínio. Quando este teor está muito baixo ou inexistente, é necessário alcalinizar o efluente artificialmente.

5.3 CLORETOS

As análises de cloretos mostraram reduções baixas em seus teores, após o processo de eletrofloculação, apresentando eficiência de remoção de 2,56 % e 4,64 %, para o tratamento a 5 volts e 12 volts, respectivamente.

“Segundo o ministério da saúde, em sua Portaria nº 1.469 de dezembro de 2000, o teor máximo de cloreto permissível, em águas de abastecimento, é de 250 mg de Cl⁻/L” (SILVA NETO e PINTO, 2012, p. 2). Valores acima do permitido se ingeridos, conferem a água mudanças no sabor, além de poder provocar efeito laxativo ao ser ingerido.

Como se pode visualizar na Figura 5.3, o teor de remoção de cloretos apresentou um baixo teor em comparação com as outras análises físico-químicas realizadas nos experimentos. Entretanto, segundo as pesquisas realizadas, os teores de remoção de cloretos apresentados mostraram-se abaixo dos trabalhos encontrados na pesquisa, em relação à análise de cloretos. De acordo com Braz et al. (2017), foi obtido um percentual de remoção de 13 % em águas de poço, por eletrofloculação com eletrodos de ferro.



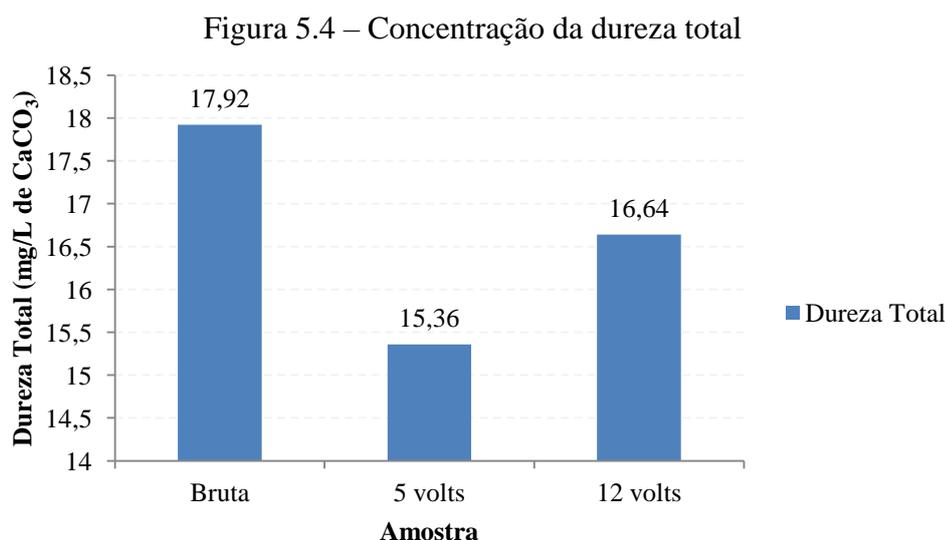
A redução de cloretos pode ser explicada, segundo Cerqueira et. al. (2011), pelo fato de que efluentes contendo íons cloreto geram reações secundárias, com a oxidação do cloro no anodo, gerando gás cloro durante o processo, em meio básico, podendo formar íons hipoclorito ou sua liberação sob forma gasosa de cloro. Entretanto a quantidade envolvida e consequentemente transforma em gás é muito pequena, configurando a baixa redução obtida.

Segundo BRAZ et. al. (2017), em seu tratamento por eletrofloculação utilizando eletrodos de Fe, a diminuição de cloretos foi de 13 %, de 9200,74 mg de Cl⁻/L para 8099,77 mg de Cl⁻/L, conferindo uma baixa eficiência na diminuição de cloretos.

O teor de cloretos também é um dos parâmetros que não é limitado pelas normas ambientais reguladoras, para lançamentos de efluentes, contido nas Resoluções do CONAMA n° 357/05, n° 393/07 ou a n° 430/11.

5.4 DUREZA TOTAL

O valor de dureza total reduzida com maior eficiência emprega-se, desta vez, com destaque para o tratamento a 5 volts, apresentando redução da dureza total de 17,92 mg/L de CaCO₃ para 15,36 mg/L de CaCO₃ e, com redução percentual de 14,29 % (Figura 5.4). O tratamento a 12 volts apresentou redução de 17,92 mg/L de CaCO₃ para 16,64 mg/L de CaCO₃ e, com redução percentual de 7,14%.



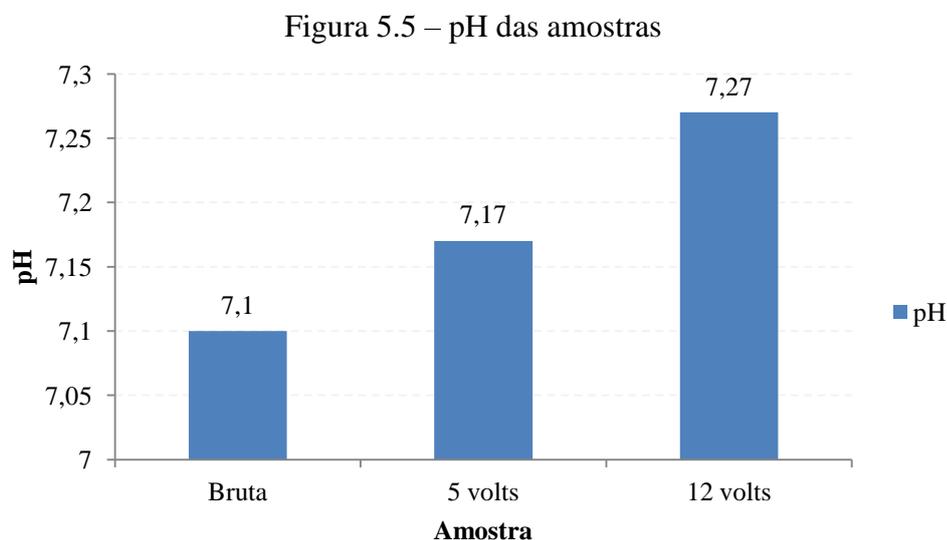
Um dos fatores que favorecem a maior eficiência com o tratamento a 5 volts esta ligada a velocidade de passivação dos eletrodos durante o processo, visto que quanto maior a tensão promovida ao sistema mais rápido será o processo de oxidação do eletrodo. A agitação

promovida pela chapa magnética age com o intuito de promover atrito das partículas dispersas sobre a superfície do eletrodo, conseqüentemente retirando parte do óxido formado sobre sua superfície (PIOVESAN, 2017).

Embora as reduções apresentem valores diferentes, ambos os efluentes tratados se enquadram na classificação de água macia. Tal classificação dos efluentes tratados, quanto à dureza total, não apresentariam problemas para sua reutilização, diferente do que poderia ocorrer com efluentes que apresentam concentrações mais elevadas, como citado segundo a APDA (2012), em que em águas com dureza acima de 180 mg/L de CaCO_3 pode-se induzir à formação de incrustações nas canalizações de transporte. Enquanto aquelas com teor superior a 300 mg/L de CaCO_3 , alteram o sabor da água e reduzem a ação de detergentes, e não devem ser utilizados em processos térmicos, como água de caldeiras ou em trocadores de calor, pois sob à ação do calor facilmente formariam incrustações.

5.5 pH

Nota-se que a variação do pH entre os experimentos não apresentaram variações drásticas. Entretanto, há uma elevação do pH em ambos os processos de tratamento, como pode ser visualizado na Figura 5.5.



Todas as amostras, submetidas a tratamento por eletrofloculação, apresentaram aumento em seu pH comparado com o pH inicial do efluente bruto. Segundo Cerqueira (2006), o aumento do pH dos efluentes tratados podem ser atribuídos ao consumo de íons H^+

decorrente da formação de hidrogênio no catodo, devido ao processo de eletrólise e da produção de íons OH⁻ da eletrofloculação.

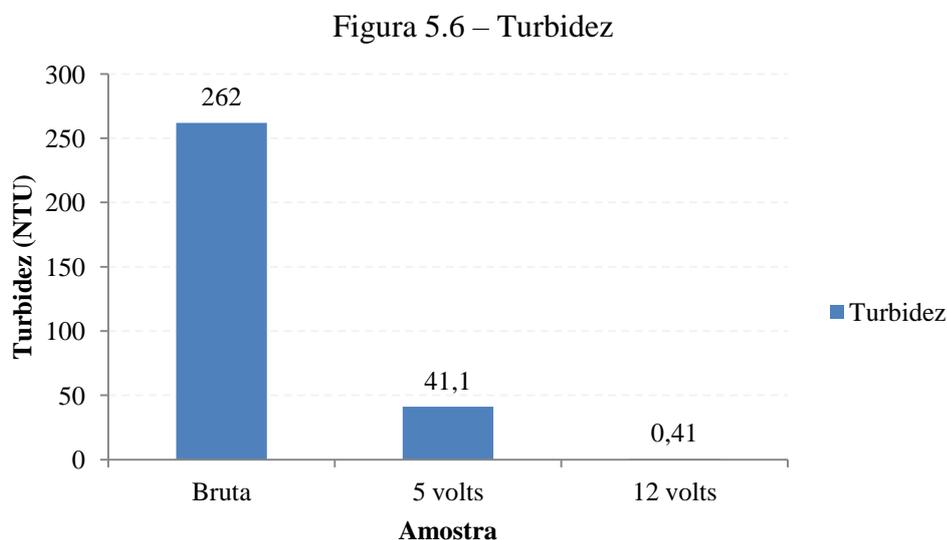
Como disposto na Resolução CONAMA n° 430/2011, os efluentes lançados nos corpos hídricos devem apresentar pH entre 5 e 9 (CONAMA, 2011). Pode-se observar que, os dados gerados, tanto do efluente bruto quanto dos efluentes tratados, estão dentro da faixa permitida pela legislação vigente.

5.6 TURBIDEZ

Na Figura 5.6, observa-se que os resultados obtidos nas análises dos efluentes bruto e tratados, apresentaram reduções consideráveis nos níveis de turbidez das amostras, de 84,31 % para o tratamento a 5 volts e, de 99,84 % para o tratamento a 12 volts.

Cerqueira (2006) obteve resultados semelhantes com eficiência de remoção chegando a 98% para tratamento por eletrofloculação de um efluente têxtil tratado.

Akkaya (2022) obteve em seus resultados redução de turbidez de 99,9 NTU para 0,3 NTU, em seu experimento com remoção da turbidez de águas residuais de petróleo, mostrando resultados similares com o tratamento realizado a 12 volts com redução de 262 NTU para 0,41 NTU, Figura (5.6).



É possível visualizar a redução da turbidez do efluente oleoso em comparação com os pós-tratados na Figura 5.7.

Figura 5.7 – Turbidez do efluente oleoso após o tratamento a 5 e 12 volts



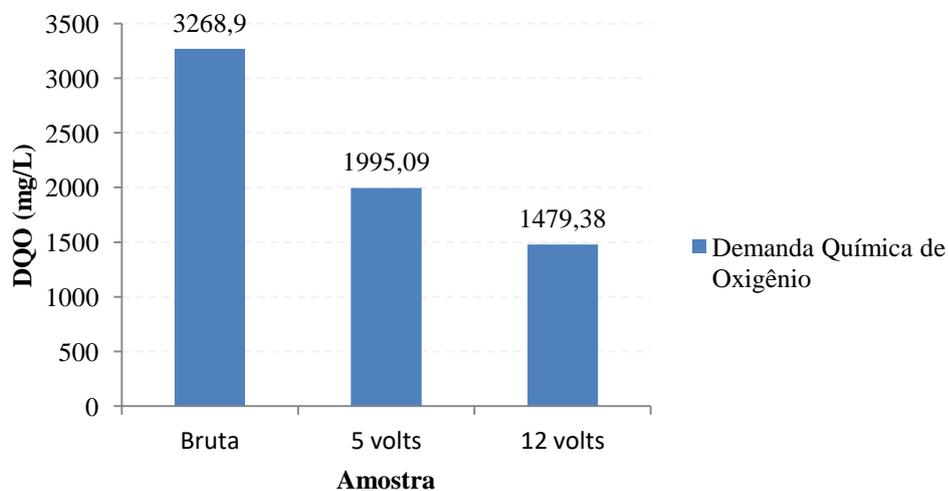
5.7 DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO (DQO)

Ainda que a DQO não tenha valores de concentração regulamentados pela CONAMA nº 430/11, as análises desse indicativo são muito utilizadas para indicação da qualidade da água.

Observa-se que, a remoção da demanda química de oxigênio alcançou 38,97 % e 54,74 %, para 5 volts e 12 volts, respectivamente.

A queda na concentração da DQO reflete a diminuição na quantidade total de componentes oxidáveis presente no efluente Figura 5.8.

Figura 5.8 – Concentração da DQO



Adhoum e Monser (2004), em seu trabalho utilizando eletrofloculação para o tratamento de águas residuais de moinho de azeitona, obtiveram remoções em DQO de 75,8 % para amostra fresca do efluente e 71 % para amostra de efluente armazenada.

Chavalparit e Ongwandee (2009) obtiveram, em seu trabalho com águas residuais de biodiesel, uma remoção de DQO de 55 %, sendo um resultado muito similar ao tratamento realizado a 12 volts neste presente trabalho.

Safari et. al. (2016) trabalharam com eletrofloculação em águas residuais oleosas, com o diesel como carga oleosa, obtendo uma remoção de DQO de 83,3 % com tempo de operação de 40 minutos, e em seu teste de duração de 60 minutos obteve uma remoção de 85 %.

Akkaya (2022), em seu trabalho com tratamento de águas residuais de petróleo, conseguiu uma eficiência de 96,18 % na remoção em DQO, maior do que visto no trabalho de Adhoum e Monser (2004), assim como uma remoção maior que a produzida neste trabalho. É válido ressaltar que em seu trabalho, Akkaya trabalha com um conjunto de eletrodos utilizando um anodo de sacrifício de ferro perfurado e placas de alumínio e ferro como cátodos, em um sistema.

Safari et. al. (2016) afirmam que o tempo de eletrólise determina a taxa de produção de íons metálicos dos eletrodos, e a remoção de DQO e óleo dependem diretamente da concentração desses íons, logo pode-se afirmar que quando o tempo de eletrólise aumenta a concentração de íons metálicos também aumenta, assim gerando mais flocos de hidróxidos e aumentando a remoção de DQO e óleos.

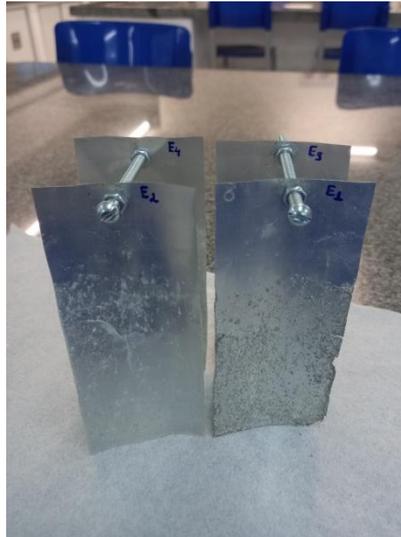
Segundo Chavalparit e Ongwandee (2009), quando o tempo de eletrofloculação é aumentado, a eficiência de remoção também aumenta, tanto para DQO quanto para remoção de óleos e graxa.

Os valores elevados das concentrações de DQO obtidos, na produção do efluente sintético de trabalho, podem ser o resultado da alta concentração de sais de cloreto utilizado em sua produção, ocasionando, talvez, interferência na análise ou interferindo ao reagir com alguma substância presente na água de abastecimento utilizada. Segundo Zuccari, Graner e Leopoldo (2005) e Dallazen (2010) os íons de cloreto podem interferir em análises de DQO por consumir íons de prata, impedido o efeito catalisador, ou por levar à redução do dicromato a crômio (III) em análises colorimétricas, como também podem interferência na oxidação da matéria orgânica devido a sua presença.

5.8 ANÁLISE DOS ELETRODOS

Os eletrodos foram utilizados em pares, tendo duas placas no polo positivo e duas para o polo negativo por processo (Figura 5.9). Os eletrodos E1, E2, E3 e E4 foram utilizados no processo a 12 volts (Figura 5.10), enquanto os eletrodos E5, E6, E7 e E8 utilizados no processo a 5 volts.

Figura 5.9 – Eletrodos montados em pares



A variação da massa (Tabela 5.2) foi calculada através da Equação 4:

$$\Delta m = (m_f - m_i) \quad (4)$$

Em que:

Δm - variação de massa (g);

m_f - massa final (g);

m_i - massa inicial (g).

Tabela 5.2 – Variação de massa dos eletrodos

Eletrodos	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Δm (g)
E1	1,7012	1,6838	-0,0174
E2	1,7015	1,7666	+0,0651
E3	1,7101	1,6924	-0,0177
E4	1,7009	1,7644	+0,0635
E5	1,7060	1,6962	-0,0098
E6	1,7032	1,7233	+0,0201
E7	1,7112	1,7020	-0,0092
E8	1,7013	1,7224	+0,0211

Nota: Δm : variação de massa do eletrodo (g); (+) – para ganho de massa do eletrodo; (-) – para perda de massa do eletrodo.

Figura 5.10 – Eletrodos utilizados no tratamento a 12 volts



Pode-se visualizar que, durante os experimentos houve variações de massa nos eletrodos (Figura 5.10). Como mostrados na Tabela 5.3, os eletrodos pares, que atuaram como cátodos durante o processo, sofreram redução e sobre superfície a agregação de matéria, conseqüentemente, sofreram um aumento em sua massa. Já os eletrodos ímpares, que atuaram como ânodos, sofreram oxidação gerando o coagulante *in situ*, o que conseqüentemente fez com que eles perdessem massa.

Pode-se, também, avaliar que, os eletrodos utilizados no processo de tratamento a 12 volts apresentaram maiores valores de ganho e perda de massa, em comparação com os eletrodos utilizados no tratamento a 5 volts. Ou seja, com o aumento da tensão utilizada, tem-se um aumento no ganho e perda de massa.

5.9 CONSUMO DE ENERGIA

O consumo de energia, utilizado durante os procedimentos experimentais, foram calculados segundo as equações dispostas na metodologia, seguindo as Equações 4.1 e 4.2.

5.9.1 Para o experimento com tensão de 5 volts

A potência consumida pelo reator eletrolítico a trabalho com 5 volts, foi calculada pela Equação 5.1.

$$P = 5 V \cdot 1,5 A \quad (5.1)$$

$$P = 7,5 W$$

O consumo de energia para o trabalho com 5 volts, foi calculado pela Equação 5.2.

$$C_{energia} = \frac{7,5 W \cdot 0,5 h}{0,0025 m^3} \quad (5.2)$$

$$C_{energia} = 1,5 \frac{KW \cdot h}{m^3}$$

5.9.2 Para o experimento com tensão de 12 volts

A potência consumida pelo reator eletrolítico a trabalho com 12 volts, foi calculada pela Equação 5.3.

$$P = 12 V \cdot 1,5 A \quad (5.3)$$

$$P = 18 W$$

O consumo de energia para o trabalho com 12 volts, foi calculado pela Equação 5.4.

$$C_{energia} = \frac{18 W \cdot 0,5 h}{0,0025 m^3} \quad (5.4)$$

$$C_{energia} = 3,6 \frac{KW \cdot h}{m^3}$$

5.9.3 Consumo de energia da chapa magnética

O consumo de energia utilizado pela chapa magnética durante os processos pode ser encontrado utilizando a Equação 5.5.

$$C_{energia} = 650 W \cdot 0,5 h \quad (5.5)$$

$$C_{energia} = 0,325 \frac{KW \cdot h}{batelada}$$

5.10 CUSTO OPERACIONAL

O consumo de energia elétrica durante os processos foi calculado utilizando a Equação 4.4 e apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Consumo de energia

Consumo	Trat. a 5 volts	Trat. a 12 volts
C_{EE}	1,5	3,6
C_{EC}	0,325	0,325
C_{Total}	1,825	3,925

Nota: Trat. a 5 volts – Tratamento a tensão de 5 volts; Trat. a 12 volts – Tratamento a tensão de 12 volts; C_{EE} – Consumo de energia do reator (kW.h/m³); C_{EC} – Consumo de energia da chapa magnética (kW.h/batelada); C_{Total} – Energia total consumida durante o processo de eletrofloculação (kW.h).

Pela tabela 5.5, verifica-se que o consumo total de energia para o experimento a 5 volts foi de **1,825 KW.h/m³** e, para o experimento a 12 volts, foi de **3,925 KW.h/m³**. Esses valores foram obtidos através da soma total de energia consumida dos equipamentos utilizados, da fonte e da chapa magnética (Equação 4.4).

Levando em consideração a Equação 4.5 e o custo de 1 kW.h para o estado de Pernambuco, em agosto de 2022, quando os experimentos foram realizados, de 1,05 R\$ (US\$ 0,20) com os impostos, o custo para os processos a 5 e 12 volts foram de R\$ 1,92/m³ (US\$ 0,37/m³) e R\$ 4,12/m³ (US\$ 0,79/m³), respectivamente.

Outros trabalhos apresentaram valores de consumo de energia diferentes em seus experimentos, como mostrado por Santin (2018), apresentando um consumo de 751,50 W.h/m³. Safari et al. (2016) apresentaram em seu trabalho um consumo de 6,47 KW.h/m³. Caetano et al. (2022) estimaram o custo para o tratamento de águas cinzas de lavanderia em torno de US\$ 4,10/m³, sendo US\$ 1,80/m³ referentes ao consumo de energia elétrica e, US\$ 2,30/m³ referentes ao consumo dos eletrodos.

Akkaya (2022), assim como apresentado neste trabalho, utilizando eletrodos recicláveis e sem custo agregado a eles, estimaram o custo de seu tratamento em efluentes petrolíferos em torno de US\$ 3,1/m³. Havendo diferença nos valores obtidos, tanto em relação ao consumo de energia, quanto ao custo de tratamento por m³, quando comparados com outros trabalhos. Essa diferença se deve a utilização de tensões, correntes, tempo de eletrofloculação e material dos eletrodos diferentes.

Seu uso em grande escala, ainda pode não ser visto com vantagens devido ao alto custo da energia elétrica no país. Entretanto, tal problema pode ser sanado com o investimento em energia solar fotovoltaica, possibilitada pela posição geográfica favorável do nosso país em boa captação. Embora, o preço dos painéis solares demandarem um valor de investimento inicial alto.

6 CONCLUSÃO

Com o desenvolvimento desta pesquisa, as seguintes conclusões foram obtidas:

- A eletrofloculação se mostrou uma alternativa eficaz no tratamento de águas residuais oleosas utilizando os eletrodos sustentáveis, se enquadrando nos parâmetros restritivos para lançamento de efluentes em corpos hídricos, presente nas legislações da CONAMA n° 393/2007 e n° 430/2011.
- A utilização de eletrodos sustentáveis, de materiais de baixo custo, permitiu a minimização dos custos do processo, além de abordar o uso ecologicamente viável e correto de um resíduo, em um importante elemento do processo, tornando a empregabilidade de eletrodos sustentáveis uma alternativa eficaz para o tratamento.
- A caracterização dos parâmetros físico-químicos como TOG, alcalinidade total, cloretos, dureza total, pH, turbidez e DQO se mostraram eficientes com boas porcentagens de remoção para as tensões de 5 e 12 volts.
- Com relação à de contaminantes, os testes realizados a 5 volts e 12 volts apresentaram resultados próximos, enquadrados nos parâmetros de lançamentos de efluentes. Quanto ao custo do processo, o tratamento a 5 volts se mostrou mais viável em relação ao tratamento a 12 volts. O estudo permitiu demonstrar que o processo de eletrofloculação pode ser flexível e viável quanto à implementação de novas configurações para o tratamento de efluentes mantendo bons valores para os padrões estudados.

REFERÊNCIAS

ADHOUM, N.; MONSER, L. Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mill wastewater by electrocoagulation. **Chemical Engineering and Processing**, v. 43, p. 1281 – 1287, 2004. DOI: 10.1016/j.cep.2003.12.001

AKKAYA, G. K. Treatment of petroleum wastewater by electrocoagulation using scrap perforated (Fe-anode) and plate (Al and Fe-cathode) metals: Optimization of operating parameters by RSM. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 187, p. 261 – 275, 2022. DOI: doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.048

ANA – Agência Nacional de Águas. **Água no mundo**. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/agua-no-mundo#>. Acesso em: 11/11/2021.

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Petróleo**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/petroleo>. Acesso em: 12/04/2023

APDA – Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas. **DUREZA TOTAL**. Disponível em: <https://www.apda.pt/site/upload/FT-QI-10-%20Dureza%20total.pdf>. Acesso em 10/08/2022.

BARBOSA, A. M. D. A.; NAVONI, J. A.; TAVARES, J. L. Caracterização e análise do potencial da água produzida como alternativa para reuso. **Holos**, v.8, p. 1 – 15, 2019. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2019.9200>

BARROS, D. P. M.; GUIMARÃES, I. O. **Águas residuais da indústria petrolífera: uma introdução. Anais do congresso nacional de engenharia de petróleo, gás natural e biocombustíveis**. Disponível em: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/10208>. Acesso em: 12/02/2023.

BELELI, Y. S. **Tratamento de águas residuais da indústria de petróleo pelo processo de separação por membranas**. Uberlândia, 33 p. Monografia (Graduação em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2019.

BENSADOK, K.; BENAMMAR, S.; LAPICQUE, F.; NEZZAL, G. Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 152, p. 423 – 430, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.06.121>

BORGES, B. B. G. **Tratamento da água produzida do petróleo para injeção em mananciais**. Natal, 78 p. Trabalho de termino de curso (Graduação em Engenharia de Petróleo). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

BRAZ, A. S.; FONSECA, T. M. D.; SILVA, R. A.; SILVA, I. F. M.; FILHO, E. D. S. Viabilidade da eletrofloculação como alternativa de tratamento da água de poço artesiano utilizando materiais de baixo custo. **Encontro Internacional de Jovens Investigadores**, Edição Brasil, 2017. Disponível em: <http://www.editorarealize.com.br/artigo/visualizar/50222>. Acesso em: 27/09/2022.

CAETANO, M. O.; SILVA, I.; CARVALHO, E. C.; GOME, L. P. Efficiency of electrocoagulation in the treatment of laundromat greywater. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, p. 91 – 101, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-4152201900025>

CANELLE, T. D.; LIMA, E. C.; BORGES, L. A. C. PANORAMA DOS RECURSOS HÍDRICOS NO MUNDO E NO BRASIL. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente – RAMA**, v. 11, n. 4, p. 1259 – 1282, Paraná, 2018. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2018v11n4p1259-1282>.

CERDOTES, A.; BÜHRING, M. A. Um repensar ecológico para a efetiva proteção dos recursos naturais: Por uma relação de cuidado e respeito com a natureza. **Revista de Direito e Sustentabilidade**, v. 8, p. 01 – 22, 2022.

CERQUEIRA, A. A. **Aplicação da Técnica de Eletrofloculação no Tratamento de Efluentes Têxteis**. Rio de Janeiro, 114 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Química, Instituto de Química da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CERQUEIRA, A. A.; MARQUES, M. R. C.; RUSSO, C. Avaliação do processo eletrolítico em corrente alternada no tratamento de água de produção. **Quím. Nova**, v. 34, nº1, p. 59 – 63, São Paulo, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000100012>

CHAVALPARIT, O.; ONGWANDEE, M. Optimizing electrocoagulation process for the treatment of biodiesel wastewater using response surface methodology. **J. of Environmental Sciences**, v. 21, p. 1491 – 1496, 2009. DOI: 10.1016/S1001-0742(08)62445-6

CHEN, M.L.; DO, J. S. Decolourization of dye-containing solutions by electrocoagulation, **J. Appl. Electrochem** v. 24, p. 785 – 790, 1994. <https://doi.org/10.1007/BF00578095>.

COELHO, D. A.; SILVA, A. R. S.; CASTRO, T. O.; SANTOS, R. C. G.; PASSOS, A. S. Análise da alcalinidade total e concentração de carbono inorgânico em trechos urbanos de rios: o exemplo do rio santa rita, região sudoeste da bahia. **VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, Porto Alegre/RS – 23 a 26/11/2015, p. 1 – 4. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2015/VIII-005.pdf>. Acesso em: 02/06/2022.

CONAMA, Resolução nº 357, de 17 de Março de 2005, Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA; **“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.”**; publicada no DOU nº 053, de 18/03/2005, págs. 58-63.

CONAMA, Resolução nº 393, de 8 de Agosto de 2007, Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA; **“Dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, e dá outras providências.”**; publicada no DOU nº 153, de 09/08/2007, págs. 72-73.

CONAMA, Resolução nº 430, de 13 de Maio de 2011, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA; **“Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de Março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.”**; publicada no DOU nº 92, de 16/05/2011, pág. 89.

Dallazen, M. C. **Considerações práticas da interferência de cloretos na determinação de demanda química de oxigênio (dco) e teor de carbono orgânico (tco), avaliando diferentes métodos analíticos**. Lajeado, 42 p. Monografia (Graduação em Química Industrial). Centro Universitário UNIVATES, Lajeado, 2010.

DE JESÚS TREVIÑO-TESENDEZ, J.; MEDEL, A.; MEÑAS, Y. Electrochemical Technologies for treating petroleum industry wastewater. **Current Opinion in Electrochemistry**, v. 27 (100690), p. 1 – 6, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100690>

FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E. Utilização da técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluentes têxteis: uma revisão. **EIXO**, v.2, nº 2, p. 27 – 36, 2013. DOI: <https://doi.org/10.19123/eixo.v2i2.107>

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (FUNASA). **Manual Prático de Análise de Água**. Brasília, 2006.

GAO, P.; LI, G.; WANG, H.; MA, T. Low-Abundance Dietzia Inhabiting a Water-Flooding Oil Reservoir and the Application Potential for Oil Recovery. **Hindawi – BioMed Research International**, v. 2019, p. 1 – 11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/2193453>

GEMINIANO, M. M. **Educação ambiental: um estudo de caso das escolas municipais e estaduais em Três Lagoas – MS**. Três Lagoas, 134 p. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas, 2021.

HOLT, P. K.; BARTON, G. W.; WARK, M.; MITCHELL, C. A. A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects**, v. 211, p. 233 – 248, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00285-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00285-6).

LIMA, L. A. **Estudo do sistema social e do uso de recursos naturais da comunidade Santo Antônio, São Miguel do Guamá, nordeste paraense**. Capanema, 75 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Energias Renováveis), Universidade Federal Rural da Amazônia, Capanema, 2022.

MAITI, S.; JOSHI, J. K.; MISHRA, I. M.; BHATTACHARYA, S. D. Removal of oil from oil-in-water emulsion using a packed bed of commercial resin. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 389, p. 291 – 298, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsutfa.2011.07.041>.

MENDES, P. R. C. **Controle avançado de um sistema de separação trifásica e tratamento de água**. Florianópolis, 160 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistema), Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2012.

MOLLAH, M. Y.; PARGA, R. S. J. R.; COCKE, D. L. Electrocoagulation (EC) – science and applications. **J. of Hazardous Materials**, V. 84, p. 29 – 41, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(01\)00176-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00176-5)

MOTTA, A. R. P.; BORGES, C. P.; KIPERSTOK, A.; ESQUERRE, K. P.; ARAUJO, P. M.; BRANCO, L. P. N. Tratamento de água produzida de petróleo para remoção de óleo por

processo de separação por membranas: revisão. **Eng Sanit Ambient**, v. 18 n. 1, p. 15-26, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000100003>

NASCIMENTO, I. L.; GOBBI, L. C. A.; PORTO, P. S. S.; ROCHA, S. M. S. **Eletrofloculação em efluentes oleosos utilizando eletrodos de alumínio**. COBEQ IC, Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, nº 1, Rio de Janeiro, 2014. DOI: 10.5151/chemeng-cobec-ic-01-ea-010

NETO, S. A.; MAGRI, T. C.; SILVA, G. M.; ANDRADE, A. R. Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em química. **Quím. Nova**, v. 34, nº 8, p. 1468 – 1471, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000800030>

NETO, J. L. S.; PINTO, M. R. O. ANÁLISE DE CLORETOS DA ÁGUA DE abastecimento de uma cidade localizada no estado de Pernambuco através do método volumétrico de Mohr. **ENECT – Encontro Nacional de Educação, Ciência e Tecnologia/UEPB**, p. 1 – 8, 2012. Disponível em: <https://docplayer.com.br/15657999-Analise-de-cloretos-da-agua-de-abastecimento-de-uma-cidade-localizada-no-estado-de-pernambuco-atraves-do-metodo-volumetrico-de-mohr.html>. Acesso em: 06/09/2022.

OLIVEIRA, E. S.; GOMES, V. L. A. Análise da eletroflotação no tratamento da água produzida da indústria petrolífera. **Ciências exatas e tecnológicas**, v. 7, n. 1, p. 155 – 168, 2021.

ONU – Organização das Nações Unidas. **25% da população mundial não tem acesso a água potável, alerta ONU**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/204766-25-da-populacao-mundial-nao-tem-acesso-agua-potavel-alerta-onu>. Acesso em: 28/11/2022.

PASCHOAL, F. M. M.; FILHO, G. T. Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. **Quím. Nova**, v.28, nº 28, p. 766 – 772, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000500006>

PHALAKORNKULE, C.; POLGUMHANG, S.; TONGDAUNG, W.; KARAKAT, B.; NUYUT, T. Electrocoagulation of blue reactive, red disperse and mixed dyes, and application in treating textile effluent. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 918 – 926, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.11.008>

PIOVESAN, M. **Tratamento de efluentes industriais utilizando eletrofloculação com eletrodos de alumínio e ferro**. Lages, 90 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages – Santa Catarina, 2017.

QUINTELA, B. C. S. F. **Biotecnologia aplicada à recuperação avançada de petróleo: injeção de biossurfactantes**. Fortaleza, 121 p. Tese de Doutorado (Biotecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – Ceará, 2018.

ROSA, D. F. V. **Estudo de processos meor – técnicas de recuperação avançada de petróleo com microrganismos**. Setúbal, 58 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biológica e Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biológica e Química,

Instituto Politécnico de Setúbal – Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Setúbal – Portugal, 2019.

SAFARI, S.; AZADI AGHDAM, M.; KARIMINIA, HR. Electrocoagulation for COD and diesel removal from oily wastewater. **Int. J. Environ. Sci. Technol.** 13, p. 231 – 242, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0863-5>

SANTIN, G. **Avaliação do tratamento de efluentes têxtil em escala laboratorial utilizando diferentes combinações com a eletrofloculação.** Caxias do Sul, 65 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Química), Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2018.

SANTOS, P. C. B. V. **Produção agrícola, consumo de água e externalidades no Matopiba.** Brasília, 70 p. Monografia (Ciências Ambientais), Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

SARAVANAN, A.; DEIVAYANAI, V. C.; SENTHIL KUMAR, P.; GAYAYTHRI RANGASAMY, HEMAVATHY, R. V.; HARSHANA, T.; GAYATHRI, N.; ALAGUMALAI, K. **Chemosphere**, v. 308 (136524), p. 1 – 11, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136524>

ŞENGİL İA, ÖZACAR M. Treatment of dairy wastewaters by electrocoagulation using mild steel electrodes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 137, p. 1197 – 1205, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.04.009>

SHAHREZAEI, F.; MANSOURI, Y.; ZINATIZADEH A. A. L.; AKHBARI, A. Process modeling and kinetic evaluation of petroleum refinery wastewater treatment in a photocatalytic reactor using TiO₂ nanoparticles. **Powder Technology**, v. 221, p. 203 – 212, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2012.01.003>

SIMPLÍCIO, C. F. **Sistemas de tratamento e reuso da água produzida do petróleo: uma revisão integrativa da literatura.** Natal, 51p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Petróleo), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SILVA, A. K. C.; RIBEIRO, F. C.; SILVA, N. B.; VIEIRA, T. D. L. L.; TEIXEIRA, J. A. L.; SOARES, C. F. Análise da gestão dos recursos hídricos no tocante ao domínio dos recursos naturais. **Revista de Administração**, v. 5, p. 70 – 85, 2019.

SILVA, C. S. **Valoração da eficiência de tratamento de água produzida através do cultivo de microalgas para produção de lipídios e pigmentos.** Dissertação (Mestrado em Biotecnologia) – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, Universidade Federal da Bahia, Salvador – Bahia, 2021.

SILVA, D. P. S.; CARRIÇO, C.; BARBOSA, J. V.; CAETANO, R. L.; PINTO, Z. T. Contaminação de águas superficiais e subterrâneas pelo derramamento de combustíveis e suas possíveis remediações. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n.2, p. 8557 – 8572, 2022. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n2-010>

SILVA, J. S.; SILVA NETO; A. C. Tratamento da água do petróleo por eletrocoagulação/eletrofloculação. **Revista Ambientale**, Ano 2, v. 2, p. 104 – 116, 2010. Disponível em: <https://periodicosuneal.emnuvens.com.br/ambientale/article/view/24>

SILVA NETO, J. L. S. **Análise físico-química de parâmetros de qualidade da água de abastecimento de uma cidade localizada no alto sertão do estado de Pernambuco.**

Campina Grande, 30p. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química), Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2013.

SPINELLI, M. V. P.; CARVALHO, R. M. C. M. O.; SILVA, H. P.; BRANDÃO, S. S. F.; FRUTUOSO, N. M. A. Estudo sustentável da capacidade de carga antrópica e a sua influência no ponto de equilíbrio da resiliência ambiental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 09, n. 01, p. 185 – 199, 2016.

TCHAMANGO, S.; NANSEU-NIJKI, C. P.; NGAMENI, E.; HADJIEV, D.; DARCHEN, A. Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes. **Science of The Total Environment**, v. 408, p. 947 – 952, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.10.026>

THOMAS, J. A.; TRIGGIA, A. A.; CORREIA, C. A.; FILHO, C. V.; XAVIER, J. A. D.; MACHADO, J. C. V.; SOUZA FILHO, J. E.; PAULA, J. L.; ROSSI, N. C. M.; PITOMBO, N. E. S.; GOUVEA, P. C. V. M.; CARVALHO, R. S.; BARRAGAN, R. V. **Fundamentos de engenharia de petróleo.** Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2001.

VANELI, B. P. **Valorização do emprego da hidrodinâmica de reatores nos setores petróleo & gás e de tratamento de água de abastecimento: um estudo comparativo.**

Vitória, 81 p. Projeto de Graduação (Graduação em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

VIEIRA, S. P.; OLIVEIRA, F. C. F.; PIMENTEL CAVALCANTI, L. A. Síntese do percloro de ferro a partir das águas residuais da produção de biodiesel tratadas por eletrofloculação para confecção de placas de circuito impresso. **Holos**, v. 01, p. 205 – 213, 2017. DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2017.5116>.

ZUCCARI, M. L.; GRANER, C. A. F.; LEOPOLDO, P. R. Determinação da demanda química de oxigênio (dco) em águas e efluentes por método colorimétrico alternativo.

Energia na Agricultura, v. 20, n. 4, p. 69 – 82, 2005. Disponível em:

<https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=17498&biblioteca=vazio&busca=17498&qFacets=17498&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>.

APÊNDICE

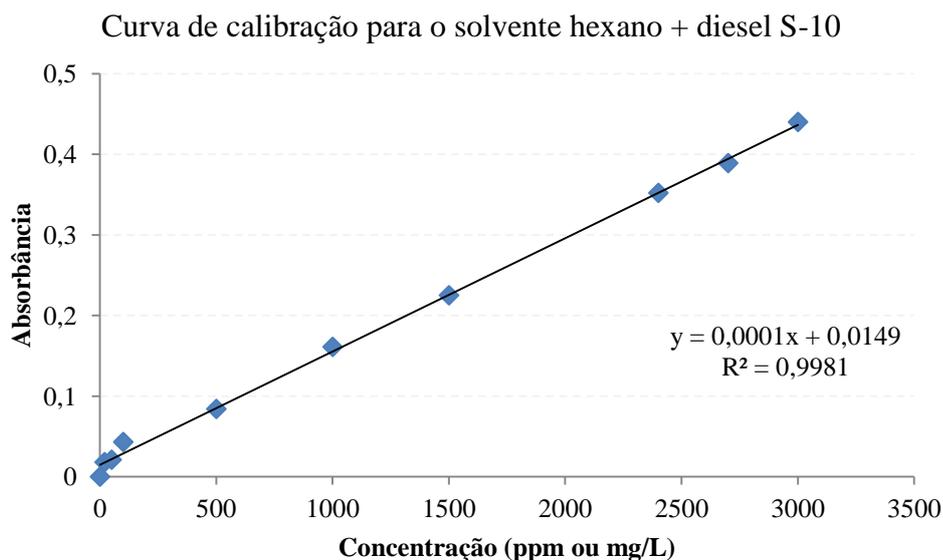
APÊNDICE A - Construção da curva de calibração

Para determinação das concentrações de óleo contidas nas amostras de água, utilizando o método de espectrofotometria, foi necessário realizar a construção de uma curva de calibração, utilizando-se de soluções com concentrações conhecida da mistura hexano+diesel S-10. Uma solução padrão de “Hexano-Diesel” de concentração 3.000 ppm foi preparada e com esta, foram realizadas diluições para soluções de 20, 50, 100, 500, 1.000, 1.500, 2.400, 2.700 e 3.000 ppm. Realizando, posteriormente, as leituras das soluções para construção da curva de calibração.

Observa-se os resultados do ensaio de absorvância, de acordo com as leituras das amostras padrões da mistura hexano + diesel S-10, e utilizando o comprimento de onda de 340 nm.

Leitura das absorvâncias das soluções padrões hexano + disesel S-10	
Concentração (ppm)	Absorvância
0	0
20	0,018
50	0,021
100	0,043
500	0,084
1000	0,161
1500	0,225
2400	0,352
2700	0,389
3000	0,440

Com os valores obtidos de absorvância e concentrações conhecidas, foi possível plotar o gráfico que representa o comportamento da relação “concentração x absorvância”, com a curva de tendência e a equação da reta.



Com os dados obtidos, mediante a construção da curva de calibração, observou-se que o coeficiente de correlação de dados “R²” foi bem próximo de 1, indicando um bom ajuste de curva e que a equação $y = 0,0001x + 0,0149$ pode ser utilizada para identificação da concentração de teor de óleos e graxas. Entretanto, é necessário realizar a correção da leitura devido à utilização do processo de extração, onde foram usados 15 mL de hexano e 25 mL da amostra, podendo, então, remontar a equação para calcular o TOG a partir da equação.

$$TOG = \frac{Absorbância - 0,0149}{0,0001} \cdot \frac{15}{25}$$

APÊNDICE B - Procedimento da técnica de extração

A técnica utilizada para determinação da concentração de óleo presente nas amostras consiste em:

- 1- Coletar 25 mL da amostra e transferi-la para um funil de separação;
- 2- Adicionar 15 mL de solvente (hexano);
- 3- Agitar por 5 minutos;
- 4- Deixar em repouso por 10 minutos;
- 5- Separar as fases aquosas, coletando a fase solvente (hexano+óleo);
- 6- Centrifugar a fase solvente durante 10 minutos, a 3000 rpm;
- 7- Ler a absorbância, em 340 nm, no espectrofotômetro;

- 8- Determinar a concentração do teor de óleo e graxas, através da curva de calibração.

Com a construção da curva padrão e os valores obtidos das leituras da extração das amostras, foi possível correlacionar os dados e obter a Equação do **APÊNDICE A**, permitindo calcular o valor da concentração de óleos e graxas presentes nas amostras.

O processo de centrifugação foi utilizado no auxílio da separação da água, ainda contida na amostra coletada, para reduzir a turbidez e evitar erros na leitura da absorbância.