



UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CCT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL – DESA

UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

RAQUEL BEZERRA COSTA

**ELETROFLOCULAÇÃO ALIMENTADA VIA ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA PARA O TRATAMENTO DE ÁGUAS
EUTROFIZADAS**

CAMPINA GRANDE - PB

2022

RAQUEL BEZERRA COSTA

**ELETROFLOCULAÇÃO ALIMENTADA VIA ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA PARA O TRATAMENTO DE ÁGUAS
EUTROFIZADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Unidade Acadêmica de Engenharia Sanitária e Ambiental – Graduação, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) como parte integrante da grade curricular do curso de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Área de concentração: Técnicas Avançadas de Tratamento de Água e Efluentes.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima.

CAMPINA GRANDE–PB

2022

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

C837e Costa, Raquel Bezerra.
Eletrofloculação alimentada via energia solar fotovoltaica para o tratamento de águas eutrofizadas [manuscrito] : / Raquel Bezerra Costa. - 2022.
41 p. : il. colorido.

Digitado.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2022.

"Orientação : Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima, Coordenação do Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental - CCT."

1. Energia solar. 2. Eletrofloculação. 3. Águas eutrofizadas. I. Título

21. ed. CDD 333.792 3

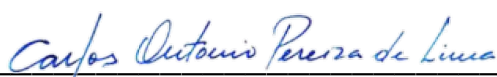
RAQUEL BEZERRA COSTA

ELETROFLOCULAÇÃO ALIMENTADA VIA ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA PARA O TRATAMENTO DE ÁGUAS EUTROFIZADAS


TCC apresentado no curso de graduação à
Universidade Estadual da Paraíba, Unidade
Acadêmica de Engenharia Sanitária e Ambiental.
Área de Concentração: Técnicas Avançadas de
Tratamento de Água e Efluente.

Aprovado em: 30/03/2022

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima
Universidade Estadual da Paraíba (Orientador/UEPB)



Prof. Dra. Geralda Gilvânia Cavalcante
Universidade Estadual da Paraíba (Examinadora/UEPB)



Prof. Dra. Keila Machado de Medeiros
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (Examinadora/UFRB)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela fé e perseverança para vencer os obstáculos.

A minha família, pela orientação, dedicação durante toda minha vida.

Ao orientador, professor Dr. Carlos Antônio Pereira de Lima, pelas orientações ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço aos professores do curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, pelos conhecimentos adquiridos ao longo do curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), aos auxílios concedidos.

Aos colegas de curso que estiveram comigo durante esses anos, compartilhando os desafios impostos pelo curso.

Enfim, sou grata a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

RESUMO

A água é um recurso extremamente essencial para a existência da vida na Terra. O ser humano necessita de água de qualidade e em quantidade suficiente para atender suas necessidades, proteger sua saúde e propiciar o desenvolvimento econômico. Nos últimos anos, a expansão das áreas urbanas e de atividades industriais tem provocado inúmeros impactos aos recursos naturais. Quando o efluente industrial não é corretamente tratado, deteriora a qualidade da água do curso hídrico receptor. Esses efluentes possuem em sua composição resíduos surfactantes e agentes quelantes, causadores de perturbações na vida aquática, principalmente pelo desenvolvimento do processo de eutrofização. A técnica de eletrofloculação surge como alternativa ao sistema convencional de tratamento de efluentes, sem a necessidade do uso de coagulantes químicos para remover a carga orgânica, cor, turbidez, metais tóxicos, entre outros usualmente presentes nos efluentes. A eletrofloculação desempenha um papel importante no tratamento de águas e efluentes, pois combina a oxidação eletrolítica parcial com precipitação físico-química ou eletroquímica. Além disso, esta técnica é de fácil operação e pode ser empregada para diferentes matrizes poluentes sem produzir poluentes residuais de lodo por reagentes. Este trabalho teve como objetivo a aplicação do processo de eletrofloculação alimentado por energia solar fotovoltaica no tratamento de águas eutrofizadas. Para verificar as melhores condições de tratamento, nas condições experimentais, foram consideradas as seguintes variáveis: pH inicial do efluente, condutividade elétrica e distância entre os eletrodos. Os níveis de pH dos experimentos mostraram alta eficiência na redução dos parâmetros de turbidez em 89,58% e remoção da DQO de 31,15%. O efluente resultante do processo de eletrofloculação apresentou, após o tratamento, três fases distintas dentro do reator: sobrenadante (resultante da flotação dos sólidos), efluente clarificado (localizado entre o sobrenadante e o sedimento) e sedimento. Pode-se concluir a viabilidade da técnica de eletrofloculação alimentada via energia solar fotovoltaica no tratamento de águas eutrofizadas devido ao baixo custo-benefício e eficiência energética. Está, pode ser aplicada em áreas rurais onde não há energia elétrica, desde que um painel solar seja acoplado à unidade.

PALAVRAS-CHAVE: Energia solar; Eletrofloculação; Águas eutrofizadas.

ABSTRACT

Water is an extremely essential resource for the existence of life on Earth. Human beings need quality water in sufficient quantity to meet their needs, protect their health and promote economic development. In recent years, the expansion of urban areas and industrial activities has caused numerous impacts on natural resources. When industrial effluent is not properly treated, it deteriorates the water quality of the receiving watercourse. These effluents have surfactant residues and chelating agents in their composition, which cause disturbances in aquatic life, mainly due to the development of the eutrophication process. This work had as its theme the electroflocculation technique, which appears as an alternative to the conventional effluent treatment system, without the need to use chemical coagulants to remove the organic load, color, turbidity, toxic metals, among others usually present in the effluents. Electroflocculation plays an important role in water and wastewater treatment, as it combines partial electrolytic oxidation with physicochemical or electrochemical precipitation. Furthermore, this technique is easy to operate and can be used for different pollutant matrices without producing residual sludge pollutants by reagents. This work aimed to apply the electroflocculation process powered by photovoltaic solar energy in the treatment of eutrophic waters. To verify the best treatment conditions, under the experimental conditions, the following variables were considered: initial effluent pH, electrical conductivity and distance between the electrodes. The pH levels of the experiments showed high efficiency in reducing turbidity parameters by 89.58% and COD removal by 31.15%. The effluent resulting from the electroflocculation process presented, after treatment, three distinct phases inside the reactor: supernatant (resulting from the flotation of solids), clarified effluent (located between the supernatant and the sediment) and sediment. It can be concluded the feasibility of the electroflocculation technique powered by photovoltaic solar energy in the treatment of eutrophic waters due to the low cost-benefit and energy efficiency. This technique can be applied in rural areas where there is no electricity, as long as a solar panel is attached to the unit.

KEYWORDS: Solar energy; Electroflocculation; Eutrophic waters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Interações físico-químicas dentro do reator de eletrofloculação	20
Figura 2. Solubilidade do alumínio em função do pH.....	22
Figura 3. Reator monopolar com arranjo em paralelo.....	23
Figura 4. Reator monopolar com arranjo em série.....	23
Figura 5. Reator bipolar com arranjo em paralelo.	24
Figura 6. Sistema de eletrofloculação de tratamento de água eutrofizada por energia fotovoltaica solar	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Matriz Experimental.....	31
Tabela 2. Planejamento Experimental.....	32
Tabela 3. Parâmetros físico-químicos e métodos empregados.....	34
Tabela 4. Análise descritiva das caracterizações analíticas do efluente pré e pós-tratamento.....	35
Tabela 5. Quantitativo consumido de alumínio nos experimentos de eletrofloculação.....	36

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	OBJETIVOS.....	12
1.1.1	OBJETIVO GERAL.....	12
1.1.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1	QUALIDADE DA ÁGUA.....	13
2.2	EUTROFIZAÇÃO.....	17
2.3	ELETROFLOCULAÇÃO.....	19
2.3.1	MECANISMOS DE ELETROFLOCULAÇÃO.....	20
2.3.2	REATORES DE ELETROFLOCULAÇÃO.....	22
2.3.2.1	REATOR MONOPOLAR.....	22
2.3.2.2	REATOR BIPOLAR.....	24
2.3.3	PARÂMETROS DE CONTROLE DO PROCESSO.....	24
2.3.3.1	EFEITO DO PH.....	25
2.3.3.2	POTÊNCIA DISSIPADA DA CORRENTE.....	25
2.3.3.3	CONDUTIVIDADE.....	26
2.3.3.4	DISTÂNCIA ENTRE OS ELETRODOS.....	26
2.3.3.5	TEMPERATURA.....	26
2.3.3.6	PASSIVAÇÃO E POLARIZAÇÃO DOS ELETRODOS.....	27
2.3.3.7	CONSUMO DOS ELETRODOS.....	27
2.3.3.8	CONSUMO ENERGÉTICO.....	28
2.3.4	VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ELETROFLOCULAÇÃO.....	28
2.4	USO DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	29
3	METODOLOGIA.....	30
3.1	COLETA DE EFLUENTE.....	30
3.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	30
3.3	SISTEMA EXPERIMENTAL.....	31
3.4	FONTE DE ENERGIA E ARRANJO DAS PLACAS DOS ELETRODOS.....	32
3.5	COLETA E PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS TRATADAS POR ELETROFLOCULAÇÃO.....	33
3.6	PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS.....	33
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	34

5 CONCLUSÃO	37
6 REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso extremamente essencial para a existência da vida na Terra. O ser humano necessita de água de qualidade e em quantidade suficiente para atender suas necessidades, proteger sua saúde e propiciar o desenvolvimento econômico.

Estima-se que 97,5% da água existente no mundo é salgada sendo imprópria ao consumo direto e à irrigação. Dos 2,5% de água doce, 69% estão concentrados nas geleiras, 30% são águas subterrâneas e 1% encontra-se nos rios. O Brasil possui 12% de toda a água doce do mundo. Mas a distribuição de água em território brasileiro é desproporcional. As regiões com mais água doce disponível possuem a menor demanda por água. Já nas regiões com as maiores necessidades de recursos hídricos, há pouca água para atender os diferentes usos (Ana, 2017).

Nos últimos anos, a expansão das áreas urbanas e de atividades industriais tem provocado inúmeros impactos aos recursos naturais. Quando o efluente industrial não é corretamente tratado, deteriora a qualidade da água do curso hídrico receptor. Esses efluentes possuem em sua composição resíduos surfactantes e agentes quelantes, causadores de perturbações na vida aquática, principalmente pelo desenvolvimento do processo de eutrofização (Fleck *et al.*, 2013).

Em muitas regiões a disponibilidade de água é limitada, devido à concentração das chuvas em curtos períodos do ano ou à má gestão dos recursos hídricos, o que pode ocasionar escassez de água para o consumo humano e outros usos (Ministério da Saúde, 2018).

Em vista da escassez dos recursos hídricos disponíveis, novas tecnologias têm sido desenvolvidas com o objetivo de reciclar água para reuso (Fouad, 2013). Entretanto, nos últimos anos, especial destaque tem sido dado à utilização de processos eletroquímicos para o tratamento de efluentes potencialmente poluidores, como, por exemplo, a técnica de eletrofloculação (Cerqueira, 2006).

A eletrofloculação é uma técnica que combina qualidades da tecnologia eletroquímica e pode resolver os problemas relacionados com a geração de efluentes ricos em teor de recep, graxas, receptors1010, metais pesados e outros compostos particulados

que podem tornar-se danosos devido a altas cargas que se pode encontrar em diversos processos industriais (Nascimento, 2011).

Os principais critérios utilizados para receptores¹¹ a eficiência do processo eletroquímico correspondem à redução dos parâmetros DQO, cor e turbidez (Fleck *et al.*, 2013).

Ao contrário dos processos convencionais em que os coagulantes são adicionados ao efluente na forma de sais, no processo de eletrofloculação os coagulantes (ferro ou alumínio) são adicionados à suspensão por meio da dissolução do ânodo, que provoca a agregação das partículas posteriormente removidas por sedimentação ou filtração (Fleck *et al.*, 2013).

O Brasil apresenta os maiores recepto de radiação solar do país, devido proximidade com a linha do equador e céu sem nuvens. O que o torna um local com grande fator preponderante para a instalação de sistemas de tratamento de águas e de efluentes alimentados por energia solar fotovoltaica que reduzam os riscos de contaminação para os corpos d'água receptores.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo a aplicação do processo de eletrofloculação alimentada por energia fotovoltaica solar no tratamento de águas eutrofizadas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Descrever os principais elementos que compõem o sistema de tratamento de água por eletrofloculação alimentado por energia solar;
- Montagem do sistema eletrofloculação e purificação de água;
- Avaliar os ganhos da qualidade e purificação do efluente em função dos parâmetros estudados.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Qualidade da Água

O conceito de qualidade da água tem relação com o uso que se faz desta. Uma água de qualidade adequada para uso industrial, navegação ou geração hidrelétrica pode não ter qualidade adequada para o abastecimento humano, recreação ou a preservação da vida aquática.

Para caracterizar uma água são utilizados indicadores da qualidade da água e se denominam não conformes quando alcançam valores superiores aos estabelecidos para determinado uso. A questão da qualidade da água está relacionada com a capacidade de dissolver uma ampla variedade de substâncias e a capacidade de transporte através da massa líquida, pelos cursos d'água. Quando acontece a circulação do corpo d'água, toda a massa de substâncias dissolvidas, dentre elas vários nutrientes, sobe até a superfície, o que pode favorecer o crescimento excessivo de algas e plantas, fenômeno da eutrofização. Entre os compostos dissolvidos na água, merecem destaque: nutrientes responsáveis pela eutrofização; compostos de nitrogênio e de fósforo; compostos de ferro e manganês – tais compostos podem passar pelas estações de tratamento de água na forma dissolvida (reduzida quimicamente), vindo posteriormente a precipitar-se, através de oxidação química, na rede de distribuição, provocando o surgimento de água com coloração avermelhada; compostos orgânicos; metais pesados; e alguns cátions (sódio, potássio, cálcio, magnésio) e ânions (carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloretos). Outro aspecto relevante são as comunidades de organismos que habitam o ambiente aquático. O sistema aquático não é formado somente pelo rio, mas inclui a bacia de contribuição onde ocorrem os fenômenos que acabam por conferir a água as suas características de qualidade (Funasa, 2014).

A qualidade requerida está estabelecida na Resolução CONAMA 430/2011, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões para lançamentos de efluentes. Os principais indicadores da qualidade da água são separados sob os aspectos físicos, químicos e biológicos.

Indicadores de Qualidade Física

Temperatura

A alteração da temperatura da água pode ser causada por fonte natural, como antropogênicas. A temperatura exerce influência na velocidade das reações químicas, nas atividades metabólicas e na solubilidade de substâncias (Jordão, 2009).

Sabor e odor

Suas origens resultam de causas naturais (vegetação em decomposição; sulfatos, bactérias, algas; e artificiais (despejos industriais e domésticos). O padrão de potabilidade exige que a água seja completamente inodora (Portal de Tratamento de Água, 2015).

Cor

A cor da água resulta de substâncias finamente dispersas – coloides - de origem orgânica (ácidos húmicos e fúlvicos) ou mineral (resíduos industriais, compostos de ferro e manganês).

Turbidez

A turbidez indica o grau de atenuação que um feixe de luz sofre ao atravessar a água. A principal fonte é a erosão dos solos. Atividades antrópicas como lançamentos de esgotos e de efluentes industriais, também são fontes importantes que causam a elevação de turbidez nas águas (ANA, 2022).

Sólidos

Os sólidos presentes na água podem estar distribuídos da seguinte forma: em suspensão (sedimentáveis e não sedimentáveis) e dissolvidos (voláteis e fixos). Sólidos em suspensão podem ser definidos como as partículas passíveis de retenção por processos de filtração. Sólidos dissolvidos são constituídos por partículas de diâmetro inferior a 10^{-3} μm e que permanecem em solução mesmo após a filtração.

Condutividade elétrica

É a capacidade de transmitir a corrente elétrica em função da presença de íons dissolvidos na água. As águas naturais apresentam teores de condutividade na faixa de 10

a 100 S.cm^{-1} , em ambientes poluídos por esgotos domésticos ou industriais os valores podem chegar a 1.000 S.cm^{-1} (Funasa, 2014).

Indicadores de qualidade química

pH

O valor do pH influi na distribuição das formas livre e ionizada de diversos compostos químicos, além de interferir na solubilidade das substâncias.

Alcalinidade

Indica a capacidade da água em resistir às mudanças de pH. As três formas de alcalinidade na água são: bicarbonatos (HCO_3^-), carbonatos (CO_3^{2+}) e hidróxidos (OH^-) (Jordão, 2009).

Dureza

Indica a concentração de cátions multivalentes em solução na água. Os cátions mais frequentemente associados à dureza são os de cálcio e magnésio (Ca^{+2} , Mg^{+2}). A dureza da água é expressa em mg/L de equivalente em carbonato de cálcio (CaCO_3) e pode ser classificada em mole ou branda: $< 50 \text{ mg.L}^{-1}$ de CaCO_3 ; dureza moderada: entre 50 mg.L^{-1} e 150 mg.L^{-1} de CaCO_3 ; dura: entre 150 mg.L^{-1} e 300 mg.L^{-1} de CaCO_3 ; e muito dura: $>300 \text{ mg.L}^{-1}$ de CaCO_3 . Em teores elevados: provoca incrustações nas tubulações e caldeiras, reduz a formação da espuma no sabão (Portal de Tratamento de Água, 2015).

Cloretos

Os cloretos provêm da dissolução de minerais e dos esgotos domésticos ou industriais. Em altas concentrações, conferem sabor salgado à água (Jordão, 2009).

Nitrogênio

O nitrogênio é um dos mais importantes nutrientes para o crescimento de algas e macrófitas (plantas aquáticas superiores), sendo facilmente assimilável nas formas de amônio e nitrato. O nitrogênio tem origem antropogênica, em decorrência do lançamento em corpos d'água de despejos domésticos, industriais e de criatórios de animais, assim como de fertilizantes.

Fósforo

O fósforo é o nutriente essencial para o crescimento de algas. Entre as fontes de fósforo destacam-se os esgotos domésticos, a drenagem pluvial de áreas agrícolas e urbanas para os corpos d'água, os efluentes industriais destacam-se os das indústrias de fertilizantes, frigoríficos e abatedouros (ANA, 2022).

Fluoretos

São compostos químicos formados pela combinação com outros elementos, encontrados no solo, ar, água, nas plantas e nos animais. Em concentrações elevadas, podem provocar alterações da estrutura óssea ou a fluorose dentária (Portal de Tratamento de Água, 2015).

Ferro e manganês

Nas concentrações normalmente encontradas nas águas naturais, estes elementos não apresentam inconvenientes à saúde. Causam coloração avermelhada à água, no caso do ferro, ou marrom, no caso do manganês, manchando roupas e outros produtos industrializados.

Oxigênio dissolvido

É vital para a preservação da vida aquática. As variações nos teores de oxigênio dissolvido estão associadas aos processos físicos, químicos e biológicos que ocorre nos corpos aquáticos.

Matéria orgânica: DBO e DQO

A matéria orgânica necessária aos seres heterotróficos, na sua nutrição, e aos autótrofos, como fonte de nutrientes e gás carbônico; em grandes quantidades na água, é responsável por causar cor, odor, turbidez e consumo de oxigênio dissolvido, pelos organismos decompositores (Jordão, 2009).

Micropoluentes

São elementos e compostos químicos que, mesmo em baixas concentrações, conferem à água características de toxicidade, tornando-a, assim, imprópria para grande parte dos usos. São considerados micropoluentes: metais pesados,

defensivos agrícolas, alguns detergentes e uma ampla gama de novos produtos químicos elaborados artificialmente para uso industrial (Funasa, 2014).

Indicadores de qualidade biológica

Coliformes

Os organismos patogênicos que habitam no intestino de humanos e animais, ao serem eliminados pelas fezes, atingem o ambiente aquático, podendo vir a contaminar as pessoas que se abasteçam de forma inadequada desta água. Quanto maior a população de coliformes em uma amostra de água, maior é a chance de que haja contaminação por organismos patogênicos (Funasa, 2014).

Algas

São responsáveis pela produção de grande parte do oxigênio dissolvido do corpo aquático; em grandes quantidades, como resultado do excesso de nutrientes (eutrofização), trazem alguns inconvenientes: sabor e odor; toxidez, turbidez e cor; formação de massas de matéria orgânica que, ao serem decompostas, provocam a redução do oxigênio dissolvido; e aspecto estético desagradável (Portal de Tratamento de Água, 2015).

2.2 Eutrofização

As atividades de origem humana, sobretudo domésticas e industriais, resultam na descarga de substâncias tóxicas como nitrato ou fosfato, corantes, óleos, graxas e muitos outros subprodutos que quando destinados sem um tratamento prévio, acarretam diversos problemas ao meio ambiente como a contaminação de solos e corpos d'água. Em virtude de serem lançados grandes quantidades de matérias orgânica tóxica enriquecida com minerais e nutrientes, induzem o crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas (Chislock *et al.*, 2013), processo este denominado de eutrofização. Este processo causa muitas vezes sérios impactos ambientais. Um exemplo é a proliferação de algas em uma lagoa, lago, rio ou zona costeira como resposta ao aumento dos níveis de nutrientes, forte odor em razão da decomposição anaeróbia, diminuição na penetração de luz, alteração da

cor e turbidez da água e o esgotamento do oxigênio do corpo d'água após a degradação bacteriana das algas e perturbação da vida aquática (Rosa *et al.*, 2012).

A eutrofização pode ocorrer em águas paradas como também em ambientes marinhos, porém com menor frequência, devido as condições ambientais serem menos favoráveis. A eutrofização nos corpos de água parados tornou-se um problema global de poluição da água. A clorofila, o nitrogênio total, o fósforo total, a demanda biológica ou química de oxigênio são alguns dos principais indicadores para avaliar o nível de eutrofização dessas águas (Du *et al.*, 2019).

A eutrofização implica em uma série de problemas, dentre eles destacam-se:

- Diminuição da balneabilidade das águas: Gerando dificuldades no trânsito de embarcações, redução na recreação em lagos e represas, devido ao crescimento excessivo de vegetação aquática.
- Condições anaeróbicas das águas: O excesso de matéria orgânica e demais nutrientes (N e P) aumenta a concentração de bactérias aeróbicas que consomem o oxigênio dissolvido (OD) das águas, levando à morte da biota aquática, além de gerar também odores desagradáveis devido à formação do gás sulfídrico (H_2S).
- Toxicidade pela amônia: Em condições de pH elevado, a amônia apresenta-se em grande parte na forma livre (NH_3), tóxica aos peixes, ao invés de na forma ionizada (NH_4^+), não tóxica (Sperling, 2012).
- Abastecimento humano: Lagos eutrofizados têm a qualidade da água alterada e como consequência, ocorre uma elevação nos custos de tratamento para fim de abastecimento de água potável, devido sabor e odor desagradáveis, entupimento de filtros e tubulações.

Em vista da escassez dos recursos hídricos disponíveis, diversas alternativas e novas tecnologias têm sido desenvolvidas para o tratamento desses compostos orgânicos tóxicos e possível reaproveitamento destas águas.

2.3 Eletrofloculação

A eletrofloculação (EF), também chamado de eletrocoagulação ou eletroflotação é uma técnica eletrolítica que envolve a desestabilização de poluentes emulsificados, ou em suspensão, em meio aquoso pela aplicação de uma corrente elétrica (Neto *et al.*, 2011). Esta técnica utiliza íons dos metais Ferro (Fe^{3+} ou Fe^{2+}) e Alumínio (Al^{3+}) como coagulantes, os íons são gerados *in situ*, pela oxidação do eletrodo de sacrifício constituídos de um desses metais, ocasionada pela aplicação de uma corrente elétrica aos eletrodos para tratamento de águas residuais que contenham poluentes orgânicos (Behling, 2018).

O processo acontece em um reator que funciona com uma célula eletrolítica, onde dois ou mais eletrodos de um mesmo metal são inseridos em paralelo e em contato com o efluente.

O eletrodo que sofre oxidação é chamado de ânodo, esse eletrodo gera os íons positivos do metal que coagulam as impurezas do efluente. Em certas faixas de pH os íons formam hidróxidos e poli hidróxidos metálicos que são pouco solúveis em água, por serem formados por cargas positivas eles interagem com as partículas negativas presentes na solução e formam os flocos, aumentando a eficiência de remoção das impurezas (Belan, 2014).

O eletrodo que sofre redução é chamado de cátodo, nesse eletrodo ocorre a formação de microbolhas de gás hidrogênio que vai favorecer a floculação e a flotação dos poluentes, capturando os flocos formados e arrastando-os junto as impurezas suspensas no meio líquido até a superfície, de modo a clarificar o efluente (Belan, 2014).

A geração de coagulantes *in situ*, hidróxidos metálicos no ânodo e as bolhas de gás hidrogênio no cátodo, para o alumínio, são ilustradas na Figura 1.

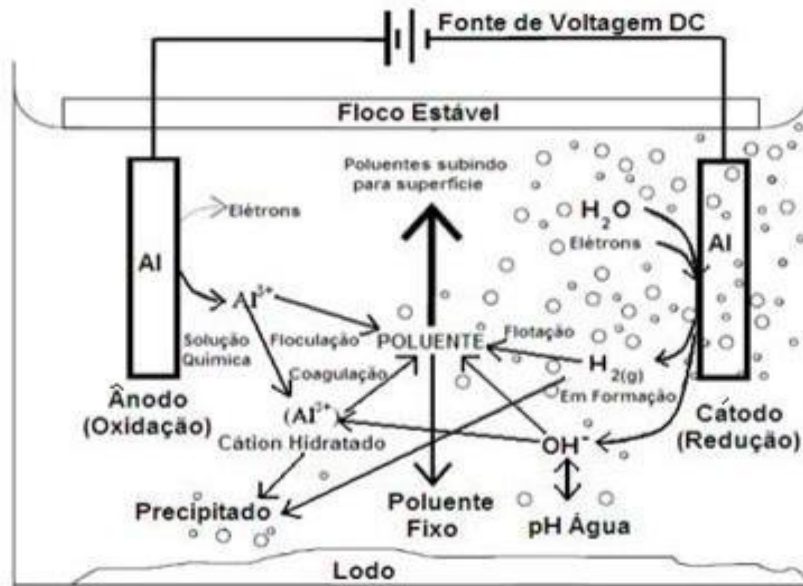


Figura 1. Interações físico-químicas dentro do reator de eletrofloculação.

Fonte: HOLT *et al.*, 2002.

2.3.1 Mecanismos de Eletrofloculação

Na técnica de EF, os eletrodos estão conectados a uma fonte externa e um parâmetro importante é a seleção do material do eletrodo e o modo de combinação do ânodo e cátodo. O mecanismo da eletrólise é altamente dependente da química do meio aquoso, especialmente da condutividade. Além disso, outras características, tais como pH do efluente, tamanho da partícula e das microbolhas e a concentração dos constituintes influenciam também no processo. A seleção apropriada do material não deve ser tóxico para a saúde humana e para o meio ambiente, sendo os mais comuns o alumínio e o ferro, por possuírem um baixo custo e serem eficazes para o processo (Behling, 2018).

As reações envolvidas na eletrofloculação utilizando eletrodos de Al estão descritas abaixo pelas Equações 1 a 4.

a) A reação de oxidação que ocorrem no ânodo:



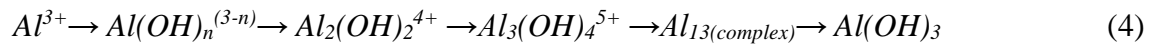
O íon positivo gerado no ânodo sofre solvatação da água e em seguida forma o Hidróxido de Alumínio, $Al(OH)_3$, que é o agente coagulante responsável por remover as impurezas do meio aquoso (Crespilho *et al.*, 2004).

b) A reação de redução que ocorrem no cátodo:



No cátodo há a formação de microbolhas de gases, que são responsáveis pela flotação das partículas suspensas e dos flocos de poluentes formados no meio aquoso (Crespilho *et al.*, 2004).

c) A reação geral que ocorre durante a eletrólise:



Devido às altas propriedades de adsorção que conferem alta afinidade para as partículas dispersas e poluentes dissolvidos no meio aquoso, esses flocos de poluentes são removidos por sedimentação ou por flotação (Khemila *et al.*, 2018).

Em uma reação de hidrólise, o pH ideal para formação do hidróxido de alumínio está entre 6,0 e 7,0 como apresenta a Figura 2.

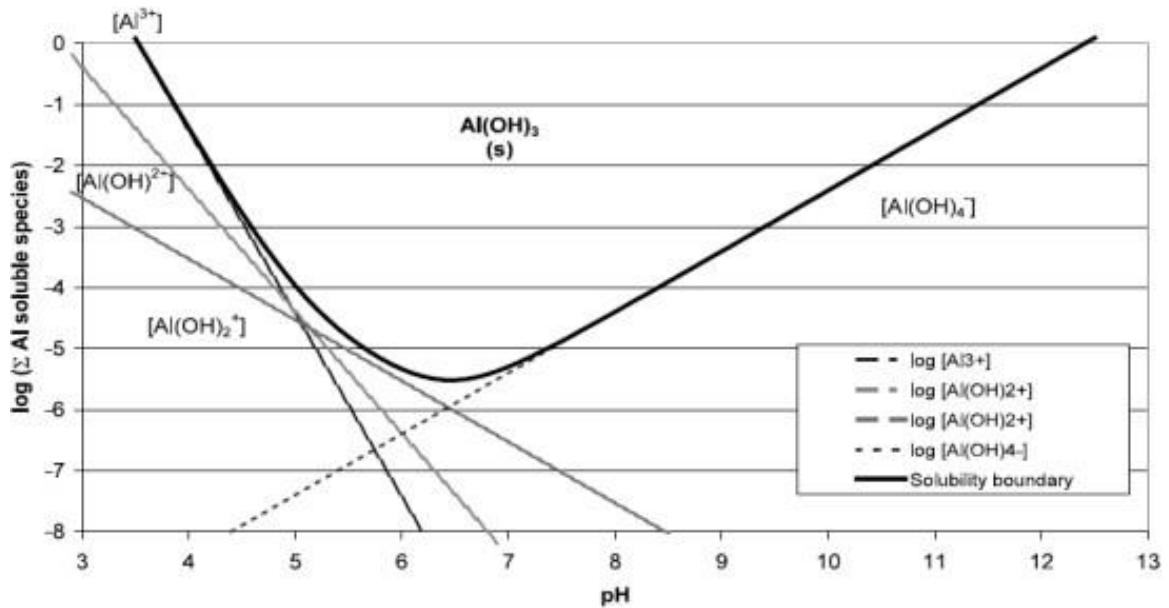


Figura 2. Solubilidade do alumínio em função do pH.

Fonte: Holt *et al.* (2001).

Estudos realizados demonstram que a eficiência dos eletrodos de sacrifício depende diretamente do pH do efluente, com melhores resultados para pH próximo à neutralidade (Fleck *et al.*, 2013).

2.3.2 Reatores de Eletrofloculação

Existem dois tipos de reatores que podem ser usados para a técnica de eletrofloculação, o monopolar e o bipolar. As características e arranjos dos reatores são apresentados a seguir (Belan, 2014).

2.3.2.1 Reator monopolar

É a forma mais simples de reator podendo apresentar arranjos em paralelo ou em série. No arranjo em paralelo, um par de eletrodos (ânodo) é interligado com outro par de eletrodos (cátodo) em paralelo, conforme visualizado na Figura 3.

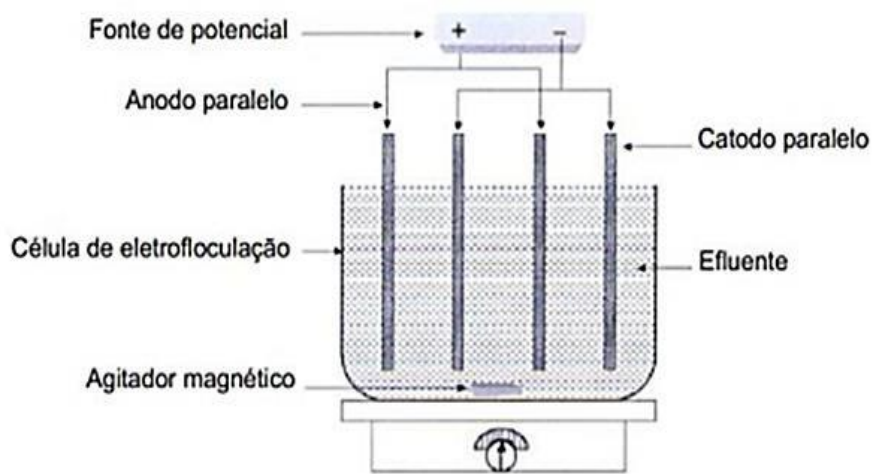


Figura 3. Reator Monopolar com Arranjo em Paralelo.

Fonte: Mollah *et al.*, 2004.

O arranjo em série (Figura 4) é eletricamente similar a uma célula simples com muitos eletrodos e interconexões. Nos reatores em série, os anodos são chamados de “eletrodos de sacrifício”, e no caso desse tipo de reator, cada par de “eletrodos de sacrifício” são interligados entre si e sem interconexão com os eletrodos externos (Belan, 2014).

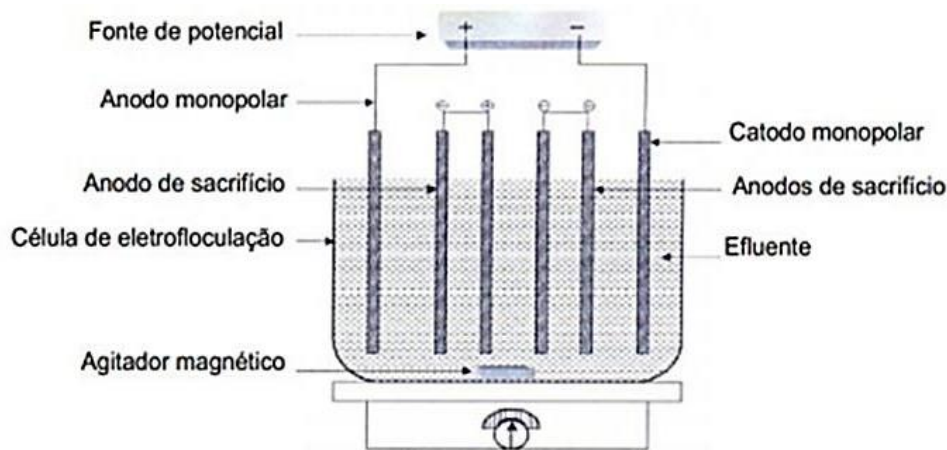


Figura 4. Reator Monopolar com Arranjo em Série.

Fonte: Mollah *et al.*, 2004.

No arranjo em série a diferença de potencial requerida é maior para uma determinada corrente, pois a conexão em série apresenta resistência mais elevada (Crespilho *et al.*, 2004).

2.3.2.2 Reator bipolar

No reator bipolar os eletrodos de sacrifício são colocados entre dois eletrodos em paralelo, Figura 5, sem qualquer conexão elétrica, só os dois eletrodos monopolares são conectados à fonte de energia elétrica. Quando a corrente elétrica atravessa os dois eletrodos, os lados neutros da placa adquirem carga oposta à do eletrodo monopolar (Crespilho *et al.*, 2004).

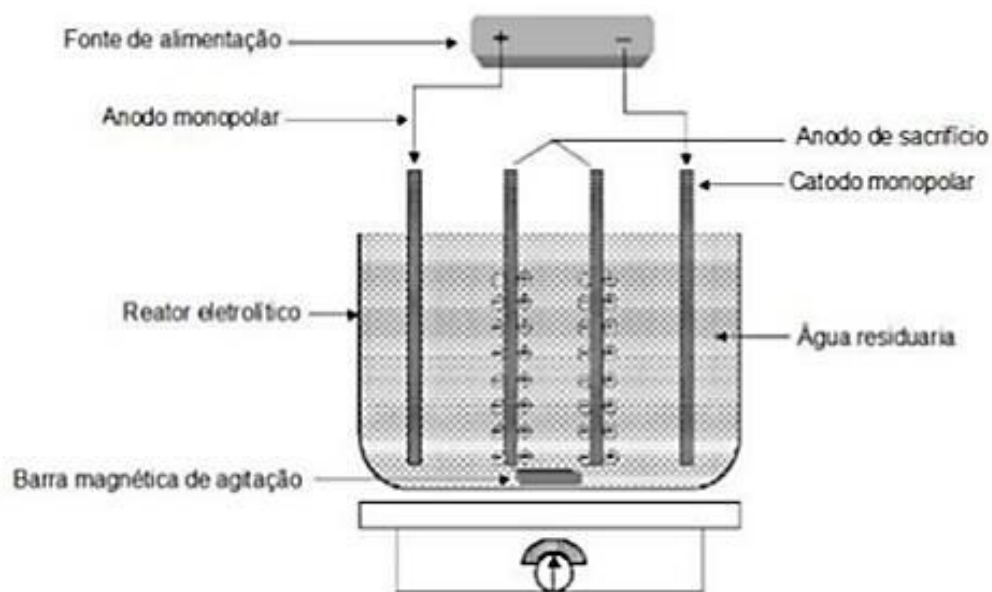


Figura 5. Reator bipolar com arranjo em paralelo

Fonte: Mollah *et al.*, 2004.

2.3.3 Parâmetros de Controle do Processo

A eficiência de um sistema de eletrofloculação está associada principalmente ao consumo energético *versus* a eficiência de remoção dos poluentes (Chen, 2004).

Além da seleção apropriada dos materiais de eletrodos outros fatores influenciam no processo como pH, potência dissipada da corrente, condutividade, distância entre os

eletrodos, temperatura, passivação e polarização dos eletrodos, consumo dos eletrodos, consumo energético, remoção dos contaminantes (Mores, 2013).

2.3.3.1 Efeito do pH

O pH do efluente influencia na etapa de coagulação. Em pH entre 6 e 7, a solubilidade do $\text{Al}(\text{OH})_3$ mínima, ou seja, a eficiência de coagulação é máxima. Acima e abaixo desta faixa de pH predomina as formas solúveis de alumínio (Mores, 2013).

2.3.3.2 Potência Dissipada da Corrente

Ao aplicar uma diferença de potencial entre dois eletrodos dentro de uma célula eletrolítica imersos em uma solução, reações eletroquímicas de oxidação e redução começam a ocorrer no ânodo e no cátodo, respectivamente, por meio das leis estabelecidas por Faraday (Mores, 2013).

A corrente medida por um multímetro em um processo de eletrofloculação é proporcional à quantidade de alumínio e/ou ferro carregado e gerado em solução (Chen, 2004). A potência elétrica está diretamente relacionada com os custos operacionais em razão de que a eletrofloculação está diretamente relacionado ao desgaste do eletrodo no processo de geração do agente coagulante.

A potência elétrica está diretamente relacionada com os custos operacionais. A potência é o trabalho realizado por unidade de tempo, representada pela Equação 5.

$$P = U.i \tag{5}$$

Onde:

P = potência

U = diferença de potencial

I = corrente elétrica

A passagem da corrente elétrica é a principal causa do processo de eletrofloculação, pois além de estar relacionada com a potência consumida está diretamente relacionada com o desgaste dos eletrodos (Giordano, 2000).

2.3.3.3 Condutividade

Torna-se necessário o ajuste da condutividade elétrica do efluente, para que a capacidade de conduzir corrente elétrica seja ampliada, reduzindo o consumo energético do meio reacional (Cerqueira, 2006).

2.3.3.4 Distância Entre Os Eletrodos

Quanto maior a distância entre os eletrodos, maior deverá ser a diferença de potencial aplicado, pois a solução possui resistividade há passagem de corrente elétrica. Distâncias maiores poderão ser impostas quando a condutividade do efluente for relativamente elevada; caso contrário, a distância deverá ser a menor possível para que o consumo de energia não seja exagerado (Crespilho *et al.*, 2004).

2.3.3.5 Temperatura

O aumento da temperatura inicialmente com temperatura até 60°C faz com que ocorra um aumento na eficiência do processo. Com isso, aumenta a condutividade e reduz o consumo de energia elétrica. A temperatura também influencia nas reações químicas, pois pode acelerar ou retardar as reações no interior de célula eletrolítica (Crespilho *et al.*, 2004).

O aumento da temperatura da solução contribui na eficiência de remoção dos íons produzidos devido ao aumento das colisões entre os íons e o coagulante formado (Daneshvar, 2003).

2.3.3.6 Passivação e Polarização dos Eletrodos

Quando a superfície do eletrodo do metal está em contato com o ar, há formação de um filme fino de óxido que faz com que o eletrodo não sofra corrosão facilmente. Uma vez formado esse filme passivo, o processo de eletrofloculação pode perder parte da eficiência em decorrência do aumento da resistividade do eletrodo (Mores, 2013; Crespilho *et al.*, 2004).

2.3.3.7 Consumo dos Eletrodos

É possível quantificar a massa do eletrodo (m_{el}) consumida durante a eletrólise (Crespilho, 2004), pela Equação 6:

$$m_{el} = \frac{i \times t \times M}{F \times n} \quad (6)$$

Onde:

i = intensidade de corrente (A);

t = tempo de aplicação da corrente (s);

M = massa molar do elemento predominante do eletrodo ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$);

n = número de elétrons envolvidos na reação de oxidação do elemento do ânodo;

F = constante de Faraday ($9,65 \times 10^4 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$).

A intensidade de corrente utilizada no processo da eletrofloculação vai determinar a quantidade de metal que será oxidada no ânodo (Mores, 2013).

2.3.3.8 Consumo Energético

Os custos operacionais estão relacionados com a manutenção e o consumo energético do sistema em k.Wh.m⁻³, Equação 7.

$$W = \frac{E \times I \times t}{1000 \times V_t} \quad (7)$$

Onde:

W = consumo energético (kWh.m³)

E = potencial aplicado (V);

I = intensidade de corrente (A);

t = tempo total de eletrólise (horas);

V_t = volume do efluente no reator (m³).

2.3.4 Vantagens e Desvantagens da Eletrofloculação

As principais vantagens da eletrofloculação de acordo com Crespilho *et al.*, (2004) e Mollah *et al.*, (2004), Ceni (2017) são:

- Os sistemas não utilizam agentes coagulantes químicos externos para o tratamento de efluentes;
- Utiliza equipamentos simples, de baixo custo e de fácil operação, onde a corrente e o potencial aplicado, podem ser medidos e controlados de maneira automatizada;
- A escolha ideal do material do eletrodo e das condições da solução permite obter ótimos resultados para tratamentos de separação;
- Remove as partículas coloidais menores;

- A formação de bolhas de gás geradas durante a eletrólise proporciona uma remoção eficiente por flotação;
- O lodo formado no processo tem uma textura espumosa e concentra baixa umidade, o que reduz o tempo de desidratação em processo de secagem;
- O cloreto de sódio (NaCl) pode ser utilizado para aumentar a condutividade do efluente e diminuir a carga elétrica aplicada, além disto, proporciona a desinfecção do resíduo pela formação de cloro;
- Alterando a densidade de corrente dá-se a possibilidade de alterar a concentração do gás no meio, favorecendo a flotação;
- Eficiência na remoção de turbidez e DQO;
- Pode ser utilizado em áreas rurais onde não há energia elétrica disponível, apenas acoplado uma placa solar fotovoltaica ao sistema.

De acordo com Mollah *et al.* (2001), Avsar *et al.* (2007) e Ceni (2017), as técnicas eletrolíticas também apresentam desvantagens no seu processo, tais como:

- O consumo da eletricidade pode ser elevado ficando inviável o processo;
- No cátodo pode ser gerada uma película de óxido impermeável proporcionando à passivação do eletrodo e a perda de parte da eficiência da unidade de EC;
- Devido à oxidação das placas, os eletrodos de sacrifício (cátodo) são dissolvidos nas águas residuárias, sendo necessário substituí-las regularmente.

2.4 Uso de Energia Solar Fotovoltaica

O uso da energia solar é cada vez mais comum em todo o mundo, desde parques industriais até as unidades residenciais. Nas áreas de tratamento de efluentes já é uma realidade no Brasil, pois é uma fonte natural e apresenta melhores desempenhos, especialmente no que se refere a resultados, custos e sustentabilidade ambiental.

Estudos analisados por pesquisadores do Centro Universitário do Leste de Minas Gerais (Unileste) e da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) demonstraram que a energia solar para o tratamento de efluentes, especialmente nos Processos Oxidativos

Avançados (POA) utilizados na degradação de poluentes de difícil remoção, proporciona melhor resultado. Quando maior for a energia solar utilizada nos POAs, maior será a quantidade de radical hidroxila liberado no meio líquido, possibilitando o aumento da taxa de degradação do poluente (Tratamento de Água, 2017).

O uso do sistema solar fotovoltaico trouxe benefícios ao sistema, através do uso de uma energia alternativa e renovável que propõe a diminuição de custos no processo. Isso se dá ao fato da técnica de eletrofloculação não ser viável economicamente quando usado a energia da rede convencional oferecida pela concessionária de energia local. (Singh, 2012)

3. METODOLOGIA

3.1 Coleta de Efluente

As amostras dos efluentes para realização dos experimentos foram coletadas no Açude de Bodocongó situado na cidade de Campina Grande/PB, durante os meses de janeiro a setembro de 2018. Os efluentes brutos foram coletados em recipientes de polietileno.

3.2 Planejamento Experimental

Com o objetivo de aperfeiçoar o processo da eletrofloculação no tratamento da água eutrofizada do açude, foi realizado um planejamento experimental 2^3 (Tabela 1), no qual obtém-se 8 experimentos a serem realizados. O planejamento experimental consiste em analisar o efluente frente à influência dos parâmetros: pH, condutividade elétrica e distância entre os eletrodos.

Tabela 1. Matriz experimental.

Número do Ensaio	pH inicial do efluente	Condutividade	Distância entre eletrodos
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Fonte: Autoria Própria, 2022.

3.3 Sistema Experimental

O sistema de tratamento foi instalado nas dependências do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba, localizado na cidade de Campina Grande – PB. Neste trabalho foi utilizado um sistema composto por: tanque de alimentação (entrada), reator em batelada com capacidade de 14 L, confeccionado em vidro transparente, acoplado com a célula eletrolítica, para a filtração do efluente pós eletrofloculação foi confeccionado um filtro de leito fixo, construído com camadas de areia fina, pedrisco e brita, tanque de saída e um sistema de energia solar fotovoltaica conectado aos eletrodos, conforme visualizado na Figura 6.

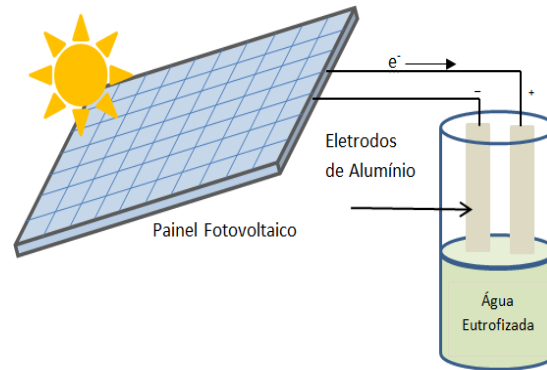


Figura 6. Sistema de eletrofloculação de tratamento de água eutrofizada por energia fotovoltaica solar.

O pH das amostras foi ajustado às condições estipuladas para realização dos experimentos (5 e 9), utilizando NaOH em concentração de 6 M e H₂SO₄ concentrado. A condutividade elétrica das amostras foi ajustada, quando necessário, com NaCl. A distância entre os eletrodos foi ajustada de acordo com as condições estipuladas para realização dos experimentos (1 e 2 cm). O planejamento experimental, utilizado para realização dos experimentos, pode ser visualizado na Tabela 2.

Tabela 2. Planejamento experimental.

Parâmetros	- Níveis +	
	pH do efluente	5
Condutividade (μS/cm)	1404	1313
Distância entre eletrodos (cm)	1	2

Fonte: Autoria Própria, 2022.

3.4 Fonte de Energia e Arranjo das Placas de Eletrodos

A energia necessária para alimentar o sistema de eletrofloculação foi fornecida por um painel fotovoltaico, que forneceu energia em corrente contínua, com cargas variáveis e intensidade da corrente de 1,96 A e 3,08 A, para uma voltagem obtida de 13,12 V.

Os experimentos foram realizados a temperatura ambiente. Para construção dos eletrodos usou-se o modelo de placas monopolares em paralelo. Utilizou-se placas de alumínio, as quais foram dimensionadas com 24x7x0,1 cm com o total de 4 placas arranjadas em paralelo com espaçamento de 1 a 2 cm entre elas.

3.5 Coleta e Preservação das Amostras Tratadas Por Eletrofloculação

Após o tratamento de eletrofloculação, foi possível identificar a presença de três fases distintas presentes no efluente do reator, sendo as fases: sobrenadante (resultante da flotação dos sólidos), efluente clarificado (localizado entre o sobrenadante e o sedimento) e sedimento. Na sequência, o efluente clarificado é filtrado no filtro de leito fixo. Para avaliar o desempenho do sistema, foram analisadas amostras do efluente bruto e tratado.

As amostras foram decantadas naturalmente por no mínimo 24 horas em recipientes de polietileno com capacidade de 500 mL, tomando-se para análise as alíquotas clarificadas após período de decantação.

3.6 Parâmetros Físico-Químicos

Os testes de desempenho do sistema foram realizados usando águas eutrofizadas com diferentes graus de eutrofização, possibilitando o controle de qualidade, por meio das caracterizações físico-químicas do efluente de alimentação e da água tratada obtida, através dos seguintes parâmetros.

Todas as metodologias utilizadas para a realização das análises para os experimentos físicos e químicos foram baseados nos procedimentos descritos no Standard Methods for Examination of Water & Wastewater (ALPHA, 2017).

As caracterizações físico-químicas das amostras (Tabela 3) foram realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental, do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual da Paraíba.

Tabela 3 - Parâmetros físico-químico e métodos empregados.

Parâmetros	Resultados	Métodos
pH	Adimensional	Potenciométrico
Condutividade	S.cm ⁻¹	Condutivimétrico
Alcalinidade	mg.L ⁻¹	Titulométrico – H ₂ SO ₄
Cloreto	mg.L ⁻¹	Titulométrico – Mohr
Dureza Total	mg.L ⁻¹ CaCO ₃	Titulométrico – EDTA
Turbidez	NTU	Nefelométrico
Sódio	mgNa.L ⁻¹	Fotometria de chama
Potássio	mgK.L ⁻¹	Fotometria de chama
DQO	mgO ₂ .L ⁻¹	Titulométrico -

Fonte: Lopes, 2013.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para a alimentação energética do reator, utilizou-se uma fonte de corrente contínua de até 20 A. Verificou-se a variação da corrente para a distância de 1 e 2 cm entre os eletrodos, para 1 cm a corrente obtida foi de 1,96 A e para 2 cm a corrente obtida foi de 3.08 A e a voltagem obtida de 13,12 V. A distância de 2 cm necessitou de uma maior diferença de potencial devido a resistividade da solução a passagem de corrente.

Realizou uma análise descritiva dos dados analíticos da caracterização das amostras que foram submetidas ao pré-tratamento e pós-tratamento. Na Tabela 4, pode-se observar a média dos resultados de cada análise, antes e pós-eletrofloculação mais filtração e a eficiência do processo através do % de redução de cada uma das análises.

Tabela 4. Análise descritiva das caracterizações analíticas do efluente pré e pós-tratamento.

Parâmetros	Média		% reduzido pelo tratamento
	Pré-tratamento	Pós-tratamento	
Turbidez	25,06	2,61	89,58
Cloretos	444,93	422,78	4,98
Dureza total	320,39	174,01	45,69
Cálcio	132,97	89,78	32,48
Magnésio	187,42	84,22	55,06
OH ⁻	0	0	0
CO ₃ ⁼	57,27	15,24	73,39
HCO ₃ ⁻	151,49	73,42	51,53
Sódio	191,59	189,13	1,28
Potássio	38,75	38,75	0
DQO	146,64	100,96	31,15

Fonte: Autoria própria, 2022.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela acima, a técnica utilizada mostrou-se eficiente na remoção dos seguintes parâmetros: turbidez (89,58), dureza total (45,69%) e DQO (31,15%), com um tempo operacional de 90 minutos.

A técnica trabalhada se mostrou eficiente para remoção de materiais sólidos em suspensão ou colóides, como matéria orgânica e inorgânica finamente divididas, resíduos industriais, contidos no efluente.

Ajustando o pH do efluente a 5 e 9, a técnica mostrou-se eficiente para formação de poli-hidróxidos de alumínio insolúveis em meio aquoso, coagulante gerado *in situ* responsável por reagir com as partículas negativas das impurezas presentes no meio aquoso e formar dos flocos, proporcionando a clarificação da água.

A filtração em filtro de leito fixo é um tratamento complementar a técnica de eletrofloculação, que faz com que o efluente clarificado percole os espaços de vazios do filtro ao mesmo tempo que retém as impurezas no leito de partículas, por bloqueio mecânico, adsorção ou troca iônica.

Ao final do último experimento, realizou a pesagem de cada placa de alumínio da célula eletrolítica, utilizado na pesquisa e através do peso final, em gramas, foi possível calcular o peso percentual de alumínio consumido durante as reações (Tabela 5). O cálculo é dado pela Equação 8.

$$\text{consumo de eletrodos de alumínio (\%)} = \frac{\text{Peso}_{\text{inicial}}}{\text{Peso}_{\text{final}}} \times 100 \quad (8)$$

Tabela 5. Quantitativo consumido de alumínio nos experimentos de eletrofloculação.

Eletrodos de Alumínio	Peso Inicial (g)	Peso Final (g)	consumida (%)
Placa 1	48,72	40,73	16,40
Placa 2	49,74	44,32	10,90
Placa 3	48,01	37,99	20,87
Placa 4	48,80	41,66	14,63

Fonte: Aatoria própria, 2022.

5 CONCLUSÃO

Durante a alimentação energética do reator, foi possível verificar que na distância de 2 cm entre os eletrodos foi necessário a aplicação de uma maior diferença de potencial devido a resistividade de passagem da corrente no meio aquoso para a distância de 2 cm entre os eletrodos. Constatando que na distância de 1 cm o sistema proporciona um menor custo operacional.

O dimensionamento do protótipo de eletrofloculação em batelada mostrou boa eficiência constatada pelos resultados obtidos no efluente eutrofizado tratado, com remoção significativas dos seguintes parâmetros: turbidez (89,58), dureza total (45,69%) e DQO (31,15%), com um tempo operacional de 90 minutos.

Ajustando o pH do efluente a 5 e 9, a técnica mostrou-se eficiente para formação de poli-hidróxidos de alumínio insolúveis em água, coagulante gerado *in situ*, responsável por remover os poluentes do meio através da floculação, proporcionando a clarificação da água.

6 REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **A distribuição desproporcional de água no Brasil**. 2017.

APHA (American Public Health Association); AWWA (American Water Works Association); WEF (Water Environment Federation). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21^a Ed. Washington – DC: APHA, 2017.

AQUINO NETO, S.; MAGRI, T. C.; SILVA, G. M.; ANDRADE, A. R. **Treatment of waste dye by electroflocculation: an experiment for undergraduate in chemistry**. Química Nova, São Paulo, v. 34, n. 8, p. 1468 -1471, 2011.

AVSAR Y. KURT U., GONULLU T., **Comparison of classical chemical and electrochemical processes for treating rose processing wastewater**. Journal of Hazardous Materials 148. 340–345, 2007.

BEHLING, L. **Eletrofloculação aplicada no tratamento de efluente lácteo: delineamento experimental e otimização de múltiplas respostas**. 65 pág. TCC (Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária). Universidade Federal da Fronteira Sul campus Cerro Largo/RS, 2018.

BELAN, A. L. D. **Eletrofloculação aplicada ao tratamento de efluentes têxteis: revisão bibliográfica**. 30 p. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental em Municípios). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2014.

CENI, G. **Estudo da eletrocoagulação aplicada associativamente com peróxido de hidrogênio no tratamento de efluentes líquidos de laticínios**. Tese de doutorado. ERECHIM, RS. 84 p., 2017.

CERQUEIRA, A. A. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis**. Rio de Janeiro, 106 p., 2006.

CHEN, X.; CHEN, G.; YUE, P.L. **Novel electrode system for electroflotation wastewater**. Environ. Sci. Technol., v. 36, 2002.

CHISLOCK, M. F.; DOSTER, E.; ZITOMER, R.A.; WILSON, A.E. **Eutrophication: causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems.** *Nature Education Knowledge*. 4 (4): 10, 2013.

CRESPILHO, F. N.; SANTANA, C. G.; REZENDE, M. O. O. **Tratamento de efluente de indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação.** *Química Nova*, v.27, p.387-392. 2004.

DANESHVAR, N., ASHASSI-SORKHABI, H.; TIZPAR, A. **Decolorization of orange II by electrocoagulation method.** *Separation and Purification*, vol 31, p. 153-162, 2003.

DU, H.; CHEN, Z.; MAO, G.; CHEN, L.; CRITTENDEN, J.; LI, R. Y. M.; CHAI, L. **Evaluation of eutrophication in freshwater lakes: A new non-equilibrium statistical approach.** *Ecological Indicators*. 102: 686–692.

FLECK, L; TAVARES, M. H. F; EYNG, E. **Utilização da técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluentes têxteis: uma revisão.** 2013. 10 p. *Revista EIXO*, Brasília - DF, v.2 n.2, Julho – Dezembro de 2013.

FOUAD, Y. O. **Separation of cottonseed oil from oil-water emulsions using electrocoagulation technique.** Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, Alexandria University, Alexandria, Egypt. *Alexandria Engineering Journal*. 53, 199-204. 2014.

GIORDANO, G.; BARBOSA, O. F., **O processo eletrolítico aplicado ao saneamento ambiental de balneários**, ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Fortaleza, 2000. Disponível em:< <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/aresidua/i-055.pdf>> Acesso em 05/03/2022.

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.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos.** 5ª edição. Rio de Janeiro. 940 p, 2009

KHEMILA, B.; MERZOUK, B.; CHOUDER, A.; ZIDELKHIR, R. **Removal of a textile dye using photovoltaic electrocoagulation.** Sustainable Chemistry and Pharmacy, v. 7, p. 27–35, 2018.

LOPES, J. T. **Dimensionamento e análise térmica de um dessanizador solar híbrido.** 107 p. 2004.

Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAs/ Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – Brasília: Funasa. 112 p., 2014.

Ministério da Saúde. **Qualidade da água para consumo humano. Cartilha para promoção e proteção da saúde.** Brasília/DF. 53 p. 2018.

MOLLAH, M. Y. A.; MORKOVSKY P.; GOMES, J. A. G.; KESMEZ, M.; PARGA, J.; COCKE, D. L., **Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation.** Journal of Hazardous Materials, v. B114, p. 199-210, 2004.

MORES, R. **Eletrofloculação no tratamento de água residuária da suinocultura submetida à pré-digestão anaeróbia.** Dissertação. Erechim, RS. 66 p. 2013.

NASCIMENTO, M. R. **Revisão: A sinergia das técnicas eletrofloculação-electrocoagulação para a desestabilização de emulsões tipo óleo-água.** Revista Principia. Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB. N° 19. João Pessoa, 2011.

NETO, S. DE A.; MAGRI, T. C.; SILVA, G. M. DA; ANDRADE, A. R. **Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em Química.** São Paulo, SP. 4 p. 2011

Qualidade da água. Portal tratamento de água. 2015. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/qualidade-da-agua/> Data de acesso: 01/03/2022.

Resolução CONAMA N° 430, de 14/05/2011.

ROSA, A.; FRACETO, L.; CARLOS, V. **Meio ambiente e sustentabilidade.** [S.l.]: Bookman, 2012.

SINGH, G. **Electrofloculation on textile dye wastewater.** Patiala: Thapar University, 2012.

SOSSMEIER, L. T. Aplicação da eletrocoagulação ao tratamento de efluente de galvanoplastia. Dissertação. Centro Universitário Feevale. Novo Hamburgo. 71 p. 2009.

SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. [S.l.]: UFMG, 2012.