



**CENTRO UNIVERSITÁRIO FAMETRO
ENGENHARIA CIVIL**

FRANCISCO RENE RIBEIRO FREITAS

**USO DA TECNOLOGIA ELETROLÍTICA NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE
LAGOA PARA CONSUMO HUMANO**

**FORTALEZA
2021**

FRANCISCO RENE RIBEIRO FREITAS

USO DA TECNOLOGIA ELETROLÍTICA NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE LAGOA
PARA CONSUMO HUMANO

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Centro Universitário Fametro - UNIFAMETRO, como requisito parcial para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Pereira Ribeiro

FORTALEZA

2021

F866u Freitas, Francisco Rene Ribeiro.
 Uso da tecnologia eletrolítica no tratamento de água de lagoa para consumo humano.
/ Francisco Rene Ribeiro Freitas. – Fortaleza, 2021.
 54 f.; 30 cm.

Monografia - Curso de Graduação em Engenharia Civil, Unifametro, Fortaleza, 2021.
Orientador: Prof. Dr. Jefferson Pereira Ribeiro.

1. Água – Tecnologia de tratamento. 2. Água - Lagoa. 3. Processo eletrolítico. I. Título.

CDD 628.1

CENTRO UNIVERSITÁRIO FAMETRO
ENGENHARIA CIVIL

FRANCISCO RENE RIBEIRO FREITAS

USO DA TECNOLOGIA ELETROLÍTICA NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE LAGOA
PARA CONSUMO HUMANO

Aprovado em: 13/12/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jefferson Pereira Ribeiro (Orientador)
Centro Universitário Fametro – Unifametro

Prof. Me. Igor Ramos Alves
Centro Universitário Fametro – Unifametro
Membro Interno

Prof. Dr. André Gadelha de Oliveira
Universidade de Fortaleza - UNIFOR
Membro Externo

DEDICATÓRIA

Dedico a toda a minha família em especial a minha mãe, Francisca, por sempre ter me motivado e ajudado com tudo em que estava em seu alcance, muitas vezes até além disso, para que eu conseguisse realizar meus objetivos e superasse todos os obstáculos vivenciados em toda minha carreira acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido o dom da vida, saúde, sabedoria e a possibilidade de concretizar esse trabalho.

Agradeço aos meus pais, Francisca e João, e aos meus irmãos, Juliana e Renan, assim como todos os meus amigos, por sempre terem me apoiado durante a minha caminhada acadêmica.

Agradeço aos alunos bolsistas do laboratório de Processos Oxidativos da Universidade Federal do Ceará que me ajudaram a realizar a parte experimental, em especial ao mestrando em Química Analítica, Luiz Thiago Vasconcelos da Silva, por toda sua ajuda e dedicação, que foram imprescindíveis para que eu conseguisse realizar o presente trabalho.

Agradeço também ao Professor Dr. Jefferson Pereira Ribeiro por sua orientação e ajuda que foram de extrema importância para a concretização desse trabalho.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.

(Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Há tempos a humanidade vem sofrendo com a escassez de água potável. Apesar do Brasil apresentar uma grande reserva de mananciais de água doce, grande parte encontra-se imprópria para o consumo humano. Nesse trabalho será relatado o uso da eletro-coagulação-floculação-flotação no tratamento de água bruta. Para tal, foi realizada uma coleta da água da lagoa de Croatá, situada no município de São Gonçalo do Amarante, que apresentava uma grande quantidade de matéria orgânica, o que foi evidenciado pela eutrofização presente nesse corpo hídrico. Ao realizar os experimentos em batelada no laboratório, foi analisada a influência de algumas variáveis no tratamento: natureza dos eletrodos (aço e alumínio), corrente elétrica (1A e 3 A), agitação (40 RPM e 80 RPM), tempo de exposição (15min e 30min) e número de placas de eletrodo (2 e 4 placas). Ao todo foram 16 experimentos e após as análises dos experimentos realizados foi constatado que o Experimento 1 – Alumínio, com um tempo de exposição de 15 minutos, foi o mais eficiente dentre os experimentos realizados. Para esse experimento foi empregada uma corrente elétrica de 1 A, rotação de 40 RPM e 2 eletrodos de alumínio. Esse experimento foi refeito utilizando essas mesmas variáveis, porém com tempos de exposição de 7,5 min e 15 min. Onde, o experimento com exposição de 7,5 min foi o de melhor eficiência. Os resultados para esse experimento foram: cor real de 10 PCU; turbidez de 0,34 UNT; condutividade de 7,93 mS/cm; pH de 7,18; tensão elétrica de 2,1 V; e redução de 66,7% da absorção.

Palavras-chave: Tratamento eletrolítico; eletro-coagulação-floculação-flotação; água; lagoa.

ABSTRACT

Humanity has been suffering from a shortage of drinking water for some time. Although Brazil has a large reserve of fresh water sources, a large part is unfitted for human consumption. In this work the use of electro-coagulation-flocculation-flotation in the treatment of raw water will be reported. To this end, water was collected from the Croatá lagoon, located in the municipality of São Gonçalo do Amarante, which had a large amount of organic matter, which was evidenced by the eutrophication present in this water body. When carrying out the batch experiments in the laboratory, the influence of some variables on the treatment was analyzed: nature of the electrodes (steel and aluminum), electrical current (1A and 3A), agitation (40 RPM and 80 RPM), exposure time (15min and 30min) and number of electrode plates (2 and 4 plates). Altogether there were 16 experiments and after analyzing the experiments performed, it was found that Experiment 1 - Aluminum, with an exposure time of 15 minutes, was the most efficient among the experiments performed. For this experiment an electric current of 1 A, rotation of 40 RPM and 2 aluminum electrodes were used. This experiment was redone using these same variables, but with exposure times of 7.5 min and 15 min. Where, the experiment with exposure of 7.5 min was the best efficient. The results for this experiment were: real color of 10 PCU; turbidity 0.34 UNT; conductivity of 7.93 mS/cm; pH 7.18; 2.1 V electrical voltage; and 66.7% reduction in absorption.

Keywords: Electrolyte treatment; electro-coagulation-flocculation-flotation; Water; lagoon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

EQUAÇÕES

Equação 1: Reações de oxidação do processo eletrolítico	18
Equação 2: Reações de redução do processo eletrolítico	18
Equação 3: Reação de formação dos coagulantes	18
Equação 4: Consumo Energético ECC (Wh/m ³).....	46
Equação 5: Consumo Energético no tratamento eletrolítico	47
Equação 6: Consumo energético em reais.....	47

FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática do tratamento eletrolítico com eletrodos de alumínio	19
Figura 2: Localização da lagoa e local da coleta	23
Figura 3: Amostra de água coletada da lagoa	24
Figura 4: Eletrodos utilizados	24
Figura 5: Reator de acrílico utilizado	25
Figura 6: Tubos Falcon com amostras coletadas	26
Figura 7: Fonte de alimentação utilizada.....	27
Figura 8: Preparação do reator e eletrodos	28
Figura 9: Distanciamento entre os eletrodos	29
Figura 10: Turbidímetro utilizado.....	29
Figura 11: Centrifugação das amostras.....	30
Figura 12: Fotômetro Multiparâmetro utilizado	30
Figura 13: pHmetro utilizado	31
Figura 14: Condutímetro utilizado	31
Figura 15: Filtro de seringa utilizado	32
Figura 16: Espectrofotômetro utilizado	32
Figura 17: Final do experimento com alumínio.....	38
Figura 18: Final de um experimento com aço inox	43
Figura 19: Antes e depois da realização do experimento otimizado	47

GRÁFICOS

Gráfico 1: Resultados das análises da Tensão (alumínio).....	33
--	----

Gráfico 2: Resultados das análises de pH (alumínio).....	34
Gráfico 3: Resultados das análises de Condutividade (alumínio).....	35
Gráfico 4: Resultados das análises de Turbidez (alumínio).....	36
Gráfico 5: Resultados das análises de Cor real (alumínio).....	37
Gráfico 6: Resultados das análises de Tensão (aço inox).....	39
Gráfico 7: Resultados das análises de pH (aço inox).....	40
Gráfico 8: Resultados das análises de Condutividade (aço inox).....	41
Gráfico 9: Resultados das análises de Turbidez (aço inox).....	42
Gráfico 10: Resultados das análises de Cor Real (aço inox).....	43
Gráfico 11: Resultados Experimento Otimizado.....	46
Gráfico 12: Análise de UV-VIS.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Padrão Bacteriológico da água para consumo humano	20
Tabela 2: Parâmetros de Turbidez	21
Tabela 3: Variáveis do experimento	26
Tabela 4: Divisão das variáveis por experimento	26

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

λ	Comprimento de onda
A	Ampére
Cond.	Condutividade
L	litro
m	metro
mS/cm	miliSiemens por centímetro
pH	Potencial Hidrogeniônico
PCU	Unidades de cobalto de platina
RPM	Rotações por minuto
uH	Unidade Hazen
uT	Unidade de Turbidez
UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez
UV-VIS	Ultravioleta Visível
V	Volt

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos Específicos	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 O Processo Eletrolítico	17
3.2 Parâmetros da água para o consumo humano	20
3.3 Eletrodos	22
4 METODOLOGIA	23
5 RESULTADOS	33
5.1 Eletrodos de Alumínio	33
5.2 Eletrodos de Aço Inox	38
5.3 Experimento Otimizado	44
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
REFERÊNCIAS	51
APÊNDICE A – CAPTURA DE TELA DA PLANILHA DOS RESULTADOS COLETADOS DAS ANÁLISES PARA ELETRODOS DE ALUMÍNIO	54
ANEXO B – CAPTURA DE TELA DA PLANILHA DOS RESULTADOS COLETADOS DAS ANÁLISES PARA ELETRODOS DE AÇO INOX	55

1 INTRODUÇÃO

A quantidade de água doce no Brasil não se encontra distribuída uniformemente por todo o país. Cerca de 80% dessa água está concentrada na região amazônica enquanto os outros 20% estão divididas por todos os outros estados, onde apenas 3% se encontram disponível na região Nordeste do país (BRANDÃO *et al.*, 2019). Na região nordeste esta disposição de água ainda é mais escassa, tanto por conta do clima semiárido da região, com uma grande quantidade de radiação solar o ano todo, o que propicia a uma grande evaporação de mananciais, como pelo regime escasso de chuvas, que geralmente ocorre em um curto período e bem regrado, concentrado entre os meses de janeiro e maio.

Além disso, com a crescente demanda de água potável para a população que está aumentando consideravelmente no decorrer do tempo, a quantidade de água potável está diminuindo gradativamente. Outro fator alarmante, consiste na poluição de grande parte de mananciais por conta de ações antrópicas (BRASIL, 2006). Fato que contribui ainda mais para o agravamento da situação de escassez de água potável para consumo humano.

No decorrer do tempo, diversos tratamentos alternativos para a água foram desenvolvidos e um deles consistiu no tratamento eletrolítico. No qual foi realizado pela primeira vez em 1889, em Londres, para tratamento de águas residuárias da população para ser lançada ao mar (VIK, 1984 *apud* BRACHER, 2018). Sua aplicação só é possível com o uso de corrente elétrica, pois se trata de uma eletrólise aquosa, dessa forma ocorre de forma não espontânea, onde a eletricidade será a perscrutora para a ocorrência de processos de oxirredução e formação dos coagulantes. Isso permitirá com que ocorra coagulação, floculação e flotação das partículas em suspensão na água.

Para a realização do processo de eletro-coagulação-floculação-flotação é imprescindível o uso de corrente elétrica, podendo essa corrente ser contínua ou alternada, controlada por uma fonte de alimentação. Na fonte é possível visualizar e regular as tensões elétricas e intensidades das correntes elétrica empregadas. Com isso é possível a produção dos coagulantes necessários para a ocorrência do processo eletrolítico. E com os valores da corrente e tensão elétrica é possível o cálculo do gasto energético para realização do experimento (RIBEIRO, 2017). Com

esses dados há a possibilidade de calcular aproximadamente o gasto energético para cada experimento realizado.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar o tratamento de água de lagoa com o emprego de eletro-coagulação-floculação-flotação almejando atingir os parâmetros de potabilidade para o consumo humano, conforme a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021.

2.2 Objetivos Específicos

- Confeccionar e operar um reator de batelada em material acrílico para realização do processo eletrolítico.
- Analisar a eficiência do uso de placas de metais (alumínio e aço inox), corrente elétrica (1 A e 3 A), absorção, agitação (40 RPM e 80 RPM), tempo de exposição (7,5 min, 15 min, e 30 min), número de eletrodos em série (2 e 4 placas) no tratamento eletrolítico.
- Analisar a variação dos parâmetros físico-químicos (pH, condutividade, turbidez, cor real, absorção) da água da lagoa no decorrer do processo eletrolítico.
- Analisar o consumo energético empregado no tratamento de melhor eficiência.
- Analisar a viabilidade do uso da tecnologia eletrolítica no tratamento de água de lagoa.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O Processo Eletrolítico

A realização de um processo eletrolítico envolve a realização de diversos outros processos, tais como a floculação, flotação, oxidação, cloração, precipitação, eletrólise, clarificação, separação iônica, ozonização, desinfecção (MAIA, 2014). O que o torna mais vantajoso em relação a outros processos em que isso ocorre de forma não simultânea.

O processo de eletrofloculação ocorre por meio do uso da energia elétrica que propicia reações de redução e oxidação nos eletrodos utilizados. Onde, segundo NETO *et al.* (2011), ocorre uma desestabilização de poluentes emulsificados, ou em suspensão, no meio aquoso. Por definição, os metais sólidos conectados são chamados de eletrodos, e o eletrodo onde ocorre a oxidação (perda de elétrons) é chamado de ânodo e onde ocorre a redução (ganho de elétrons) de cátodo (BROWN *et al.*, 2016).

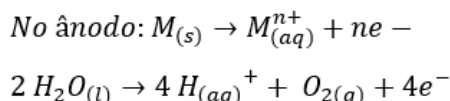
Geralmente, nesse processo, são utilizados como eletrodo materiais metálicos como o ferro ou o alumínio, devido a esses metais sofrerem oxidação, formação de cátions e posteriormente de hidróxidos que agem como coagulantes. A aplicabilidade desse processo é vantajosa principalmente na remoção de poluentes de águas residuais de indústrias têxteis, urbanas, aterros de lixo, óleos, metais (NETO *et al.* 2011).

Diferentemente de outros processos comumente empregados no tratamento de efluentes, o processo eletrolítico se destaca por propiciar uma remoção mais rápida e eficiente da matéria orgânica presente no efluente. E para sua realização não é necessário a adição de substâncias adicionais, pois durante sua realização o seu coagulante (substância responsável pela desestabilização do material particulado ou em suspensão) é gerado pelo próprio eletrodo utilizado no processo, no qual é chamado eletrodo de sacrifício.

Nessa perspectiva o uso da eletroquímica traz diversas vantagens comparando com processos convencionais. Entre elas estão a versatilidade no uso, eficiência energética, facilidade de automação, compatibilidade com o ambiente e eficiência de custos (IBANEZ, 2002).

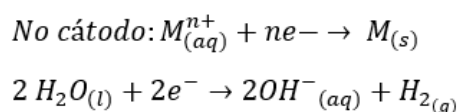
Como mencionado anteriormente os eletrodos de sacrifício que geralmente são empregados são ferro e alumínio, dessa forma, o processo ocorre através de uma oxidação do ânodo metálico (Equação 1) formando cátions metálicos que em seguida reagirão com hidroxilas (OH⁻) derivadas da redução da água no cátodo (Equação 2) formando hidróxidos de alumínio ou hidróxidos de ferro (II ou III) (Equação 3).

Equação 1: Reações de oxidação do processo eletrolítico



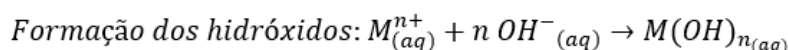
Fonte: O autor (2021)

Equação 2: Reações de redução do processo eletrolítico



Fonte: O autor (2021)

Equação 3: Reação de formação dos coagulantes

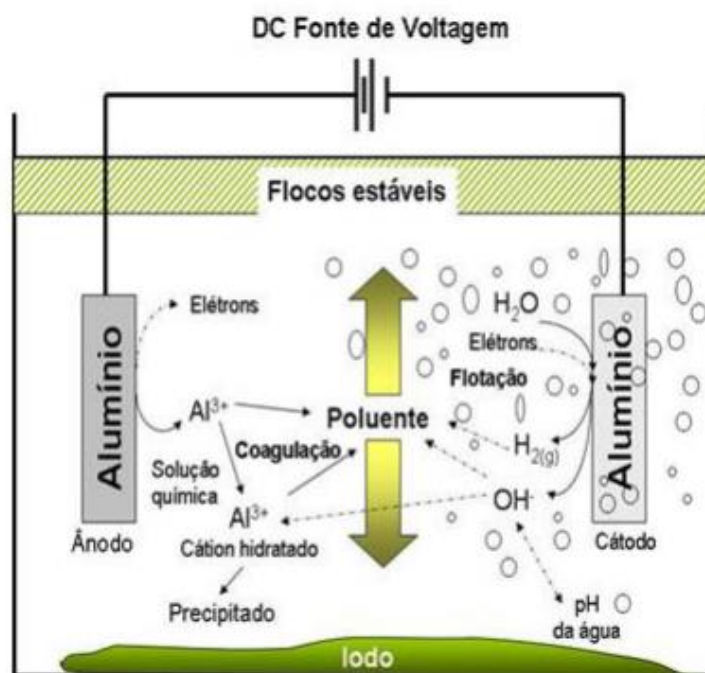


Fonte: O autor (2021)

Paralelamente a essas equações ocorre também a hidrólise da água, o que propiciará a formação de gás oxigênio e hidrogênio que serão os responsáveis pelo carregamento do material coagulado para a superfície por conta da elevação das microbolhas geradas por esses gases (NETO *et al.* 2011).

Na figura 1, a seguir, todas as etapas do processo de eletro-coagulação-floculação-flotação com eletrodo de alumínio são representadas. Iniciando pela oxidação do alumínio metálico em Al³⁺ (aq.) e redução da água em H⁺ (aq.) e OH⁻ (aq.), posterior formação de H₂ (g) e hidróxido de alumínio, Al(OH)₃.

Figura 1: Representação esquemática do tratamento eletrolítico com eletrodos de alumínio



Fonte: PESSOA (2008)

Para analisar os resultados oriundos dos processos eletrolíticos, diversos parâmetros devem ser considerados. Eles serão a referência para avaliar a eficiência do processo utilizado. Dentre tais pode-se citar, conforme SALVADOR *et al.* 2017: os parâmetros elétricos, parâmetros eletroquímicos, parâmetros biológicos, parâmetros físico-químicos e os parâmetros físicos; sendo os parâmetros elétricos e eletrolíticos os determináveis em um processo eletrolítico.

Nos parâmetros elétricos é avaliado a potência e o tipo de corrente elétrica que será aplicado durante o tratamento do efluente. Assim como quais eletrodos serão empregados para a célula eletrolítica, sua geometria e as disposições desses eletrodos no reator eletrolítico (SALVADOR *et al.*, 2017).

Já na análise dos parâmetros eletroquímicos deve ser considerada a concentração de eletrólitos presente no efluente, pois, ela será a responsável pela condução da corrente elétrica. Se o efluente apresentar uma concentração de eletrólitos considerável, isso implicará numa boa condutividade e proporcionará uma melhor eficiência no tratamento, devido a uma ocorrência maior de reações de oxirredução no reator. Em contrapartida os parâmetros físico-químicos e biológicos

serão os indicadores da eficiência do processo, portanto devem ser quantificados com a devida precisão (SALVADOR *et al.*, 2017).

3.2 Parâmetros da água para o consumo humano

Segundo a Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021, a água considerada ideal para consumo humano consiste na água potável destinada à “ingestão, preparação e produção de alimentos e à higiene pessoal, independentemente da sua origem”.

Dessa forma a água potável deve apresentar conformidade com os padrões estabelecidos também por essa Portaria. Onde encontram-se diversos padrões e dentre eles existem os microbiológicos. Para esses padrões, a água não deve apresentar coliformes totais e *Escherichia coli*, garantindo assim a qualidade desse corpo hídrico (BRASIL, 2021). Na tabela 1 os padrões Bacteriológicos da água para consumo humano são expostos.

Tabela 1: Padrão Bacteriológico da água para consumo humano

Formas de abastecimento		Parâmetro		VMP(1)
SAI		<i>Escherichia coli</i>		Ausência em 100 mL
SAA e SAC	Na saída do tratamento	Coliformes totais		Ausência em 100 mL
	Sistema de distribuição e pontos de consumo	<i>Escherichia coli</i>		Ausência em 100 mL
		Coliformes totais	Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem menos de 20.000 habitantes	Apenas uma amostra, entre as amostras examinadas no mês pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água, poderá apresentar resultado positivo
			Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem a partir de 20.000 habitantes	Ausência em 100 mL em 95% das amostras examinadas no mês pelo responsável pelo sistema ou por solução alternativa coletiva de abastecimento de água.

Fonte: Adaptado de BRASIL (2021)

Para os padrões de turbidez o valor máximo admitido consiste em 0,5 uT para água resultantes de processos de filtração rápida e 1,0 uT para águas resultantes

de tratamentos com o uso de filtração lenta (BRASIL, 2021). Os valores podem ser observados na tabela 2, abaixo.

Tabela 2: Parâmetros de Turbidez

Tratamento da água	VMP(1)	Número de amostras	Frequência
Filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta)	0,5 uT em 95% das amostras. 1,0 uT no restante das amostras mensais coletadas.	1	A cada 2 horas
Filtração em Membrana	0,1 uT em 99% das amostras.	1	A cada 2 horas
Filtração lenta	1,0 uT em 95% das amostras. 2,0 uT no restante das amostras mensais coletadas.	1	Diária
Pós-desinfecção (para águas subterrâneas)	1,0 uT em 95% das amostras. 5,0 uT no restante das amostras mensais coletadas.	1	Semanal

Fonte: Adaptado de BRASIL (2021)

Ainda na referida portaria não há menção para os valores de pH da água utilizada para consumo, porém, recomenda-se que o pH da água distribuída esteja na faixa de 6,0 e 9,5. E para a cor real é permitido pela Portaria um valor máximo de 15 uH.

Além desses parâmetros citados, outros também são importantes para análise da água, onde se pode destacar a análise da concentração de substâncias químicas indesejadas, presença de substâncias radioativas, assim como outros padrões organolépticos como gosto, odor, dureza.

O efluente a ser tratado será a água de uma lagoa eutrofizada, onde essa eutrofização é o resultado da presença de uma grande quantidade de nutrientes, como o fósforo e o nitrogênio, que propiciam a proliferação e desenvolvimento de algas na água (VENEU *et al.*, 2015).

Um dos principais processos utilizados para tratamento de água eutrofizada consiste na coagulação, sendo que no tratamento eletrolítico essa coagulação ocorre sem a aquisição de coagulantes, onde o próprio coagulante é fornecido por meio das reações de oxidação dos eletrodos que reagem com a água e formam agentes coagulantes, onde também é possível a ocorrência da floculação e flotação das impurezas.

Para realizar a caracterização dessa água existem parâmetros que devem ser analisados, como a cor, turbidez, sabor, odor, pH, alcalinidade, acidez, dureza, ferro, manganês, cloretos, nitrogênio, fósforo, matéria orgânica, oxigênio dissolvido, algas e bactérias (SINGEP, 2018). A água de lagoa dificilmente se encontrará em conformidade com estes diversos parâmetros, portanto, quase sempre necessitará de tratamentos caso ela seja selecionada para ser destinada para o consumo humano.

3.3 Eletrodos

Na realização do tratamento eletrolítico, diversos tipos de eletrodos podem ser utilizados, o que influenciará a escolha do tipo de eletrodo serão os mecanismos escolhidos para tratar o efluente. Sendo os eletrodos classificados em inertes ou reativos (SINOTI, 2004).

Os eletrodos inertes são aqueles que não sofrem alteração em sua estrutura, ou seja, não são consumidos, eles participam das reações eletrolíticas apenas doando elétrons (GARCIA, 2002). Dentre os eletrodos inertes estão o grafite, o manganês, o titânio e a platina (SINOTI, 2004).

Os eletrodos reativos são aqueles que sofrem desgaste durante as reações de oxidação sendo transformados em íons e depositados na solução do efluente. Dentre os eletrodos reativos destacam-se o ferro, o cobre e o alumínio (SINOTI, 2004). Nesse tipo de eletrodo os íons liberados pelos metais utilizados produzem os coagulantes do processo pois, a liberação desse íon em meio aquoso propicia a sua reação com a água produzindo hidróxidos derivados desses eletrodos. Vale ressaltar que o efluente deve conduzir a corrente elétrica para que esse processo ocorra, ou seja, deve possuir eletrólitos (íons) (SINOTI, 2004).

Além disso, a escolha adequada do material dos eletrodos deve levar em consideração a eficiência no tratamento eletrolítico e a baixa toxicidade do material, ou de derivados, para o ser humano ou meio ambiente (DENESHVAR *et al.*, 2007, *apud* PESSOA, 2008).

Segundo CAN e KOBYA (2008, *apud* PESSOA, 2008), o uso de eletrodos de alumínio ou ferro é geralmente o mais comum em processos eletrolíticos; o alumínio é mais eficiente do que o ferro na remoção de DQO e turbidez em meio ácido, enquanto o ferro é mais eficiente em meio alcalino; e o alumínio apresenta um desgaste menor que o do ferro durante o tratamento eletrolítico.

4 METODOLOGIA

Foram realizadas pesquisas bibliográficas para fichamento de ideias geradoras e levantamento da relevância do problema. Após definição do tema principal do trabalho e delimitação da problemática em questão, a pesquisa se deu de forma prática em campo para coleta da amostra de água do corpo hídrico em questão e análises em laboratório.

A água foi coletada na lagoa situada em Croatá, distrito do município de São Gonçalo do Amarante- CE, onde se encontra às margens da BR 222 e CE 341, conforme figura 2. Ela se encontra eutrofizada, sendo, portanto, propícia ao tratamento eletrolítico.

Foram coletados 40 L de água em 2 recipientes de 20 L, no local com latitude $3^{\circ}40'13.2''$ S e longitude $39^{\circ}07'03.0''$ O, e transferidos para uma bombona de 50 L (figura 3), para realização do processo eletrolítico no LABPOA do departamento de Química Analítica da Universidade Federal do Ceará - UFC.

Figura 2: Localização da lagoa e local da coleta



Fonte: Google Maps (2021)

Figura 3: Amostra de água coletada da lagoa



Fonte: O autor (2021)

Para análise em laboratório foi confeccionado um reator em acrílico transparente com medidas internas de 15,8 cm de largura, 31,4 cm de altura, e 4,7 cm de profundidade, comportando um volume total de aproximadamente 2,3 L. Os eletrodos utilizados foram de aço inox (liga metálica contendo ferro, cerca de 10,5% de cromo, e 1,2% de carbono) e alumínio com medidas iguais a 5 cm de largura, 25 cm de altura útil (que ficará submersa na água) e 0,3 cm de espessura, perfazendo uma área total de 275 cm² por placa. Na figura 4 pode ser observado o esquema de montagem dos eletrodos utilizados no processo de eletro-coagulação-floculação-flotação.

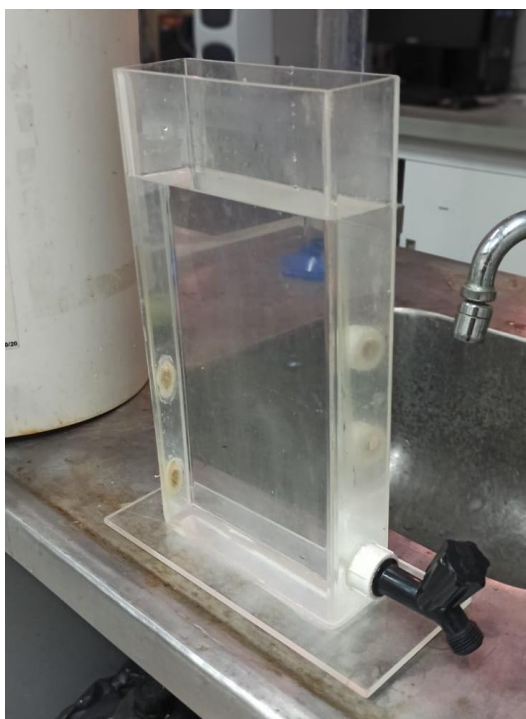
Figura 4: Eletrodos utilizados



Fonte: O autor (2021)

Na figura 5 pode ser analisado o reator montado para a realização do tratamento eletrolítico. Ele foi confeccionado em material acrílico transparente com o intuito de facilitar a visualização da ocorrência do processo.

Figura 5: Reator de acrílico utilizado



Fonte: O autor (2021)

As variações para identificação do desempenho ótimo da eletrocoagulação-floculação-flotação consistiram no uso de eletrodos de alumínio e aço inox, a variação da corrente, com intensidades de 1 e 3 A, o grau de agitação de 40 e 80 RPM, a quantidade de placas de eletrodos em 2 e 4 placas, e o tempo de detenção em 0 min, 15min, e 30min para cada experimento. Contabilizou-se ao todo 16 experimentos em laboratório levando em conta todas as variáveis descritas.

Para cada experimento eletrolítico foram utilizados 2 L de amostra de água da lagoa, e coletados 35 mL de amostra nos intervalos de tempo de 0, 15 e 30 min de tratamento eletrolítico em tubos Falcon, devidamente identificados, para posteriores análises, conforme a figura 6.

Figura 6: Tubos Falcon com amostras coletadas



Fonte: O autor (2021)

O planejamento dos experimentos, assim como arquivamento dos dados obtidos foram realizadas em planilha eletrônica, com o uso do Excel. Na tabela 3 podem ser observadas as variáveis pré-estabelecidas para realização da experimentação e na tabela 4 as variáveis detalhadas dos 16 experimentos que foram realizados.

Tabela 3: Variáveis do experimento

	Alumínio		Aço	
Corrente	1A	3A	1A	3A
Agitação	40 RPM	80 RPM	40 RPM	80 RPM
Nº Placas	2	4	2	4

Fonte: O autor (2021)

Tabela 4: Divisão das variáveis por experimento

Alumínio				Aço			
	Corrente	Agitação	Nº Placas		Corrente	Agitação	Nº Placas
Exp. 1	1A	40	2	Exp. 1	1A	40	2
Exp. 2	1A	40	4	Exp. 2	1A	40	4
Exp. 3	1A	80	2	Exp. 3	1A	80	2
Exp. 4	1A	80	4	Exp. 4	1A	80	4
Exp. 5	3A	40	2	Exp. 5	3A	40	2
Exp. 6	3A	40	4	Exp. 6	3A	40	4
Exp. 7	3A	80	2	Exp. 7	3A	80	2
Exp. 8	3A	80	4	Exp. 8	3A	80	4

Fonte: O autor (2021)

Assim como a corrente foi analisada em cada experimento, outra variável que também foi analisada consistiu na análise da tensão nos intervalos de tempo de

tratamento empregado. Essa análise foi realizada com o emprego de uma fonte de alimentação eletrônica da marca Minipa modelo MPL-3305M. Na figura 7 temos o registro fotográfico da fonte utilizada no tratamento.

Figura 7: Fonte de alimentação utilizada



Fonte: O autor (2021)

A montagem do equipamento para realização do tratamento eletrolítico foi feita com o auxílio de um suporte universal e garras metálicas prendendo as placas dos eletrodos no centro do reator e mantendo 25 cm de eletrodo submerso na água bruta, conforme a figura 8. Durante todo o processo foi realizada a agitação pré-determinada para cada experimento, e o controle do tempo das coletas das amostras foi realizado com o auxílio de um temporizador.

Figura 8: Preparação do reator e eletrodos



Fonte: O autor (2021)

Para prender e manter o distanciamento entre as placas dos eletrodos entre si, formando uma espécie de “sanduíche”, foram utilizadas abraçadeiras de nylon e um espaçador de material plástico, mantendo uma distância de aproximadamente de 0,8 cm entre as placas (Figura 9). Para condução da corrente elétrica da fonte de alimentação até os eletrodos foram usados cabos de cobre de aproximadamente 1 m de comprimento.

Figura 9: Distanciamento entre os eletrodos



Fonte: O autor (2021)

As análises de turbidez foram realizadas 7 dias após a realização do experimento por conta da disponibilidade em usar o laboratório e com o uso de Turbidímetro Portátil da marca Hanna modelo HI 98703 (Figura 10).

Figura 10: Turbidímetro utilizado



Fonte: O autor (2021)

As análises de cor real foram realizadas após centrifugação (Figura 11) da amostra coletada por 5 min em rotação 4000 RPM e com o uso de Fotômetro Multiparâmetro da marca Hanna modelo HI 83200 (Figura 12).

Figura 11: Centrifugação das amostras



Fonte: O autor (2021)

Figura 12: Fotômetro Multiparâmetro utilizado



Fonte: O autor (2021)

As análises de pH foram realizadas com o uso de Medidor de Bancada para pH da marca Hanna modelo HI 5222-01 (Figura 13).

Figura 13: pHmetro utilizado



Fonte: O autor (2021)

As análises de condutividade foram realizadas com o uso de Medidor Edge® para pH /ORP da marca Hanna modelo HI2002-02 (Figura 14).

Figura 14: Condutímetro utilizado



Fonte: O autor (2021)

Por fim, foi realizado um experimento otimizado, onde foi utilizado os parâmetros do experimento de maior eficiência entre os 16 realizados ao todo. Nesse experimento foi realizada também a análise de UV-VIS das amostras coletadas. Para realização da análise de UV-VIS as amostras do experimento otimizado foram filtradas com uso de filtro para seringa CHROMAFIL® XTRA em PVDF (difluoreto de polivinilideno) com poro de $0,45\mu m$ (Figura 15).

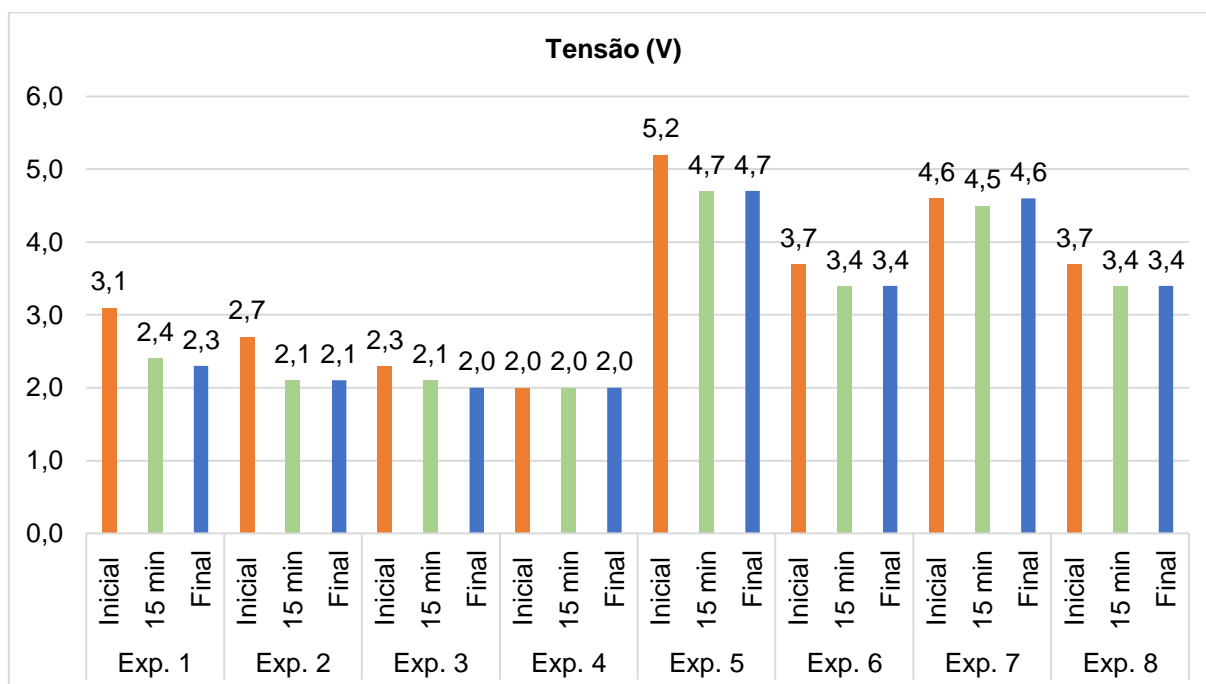
5 RESULTADOS

5.1 Eletrodos de Alumínio

Os experimentos com menor gasto energético com o uso de eletrodo de alumínio foram os experimentos 3 e 4, conforme pode ser analisado no gráfico 1. O que foi evidenciado por apresentarem as menores tensões elétricas analisadas, com 2,0 V no instante final do experimento. Isso pode ser explicado pela diminuição da resistência elétrica do meio já que a corrente elétrica permanece inalterada durante todo o experimento. O que também implica na formação de compostos moleculares não condutores de eletricidade. Nesses experimentos foi usada uma corrente de 1 A, uma agitação de 80 RPM e 2 e 4 placas do eletrodo, respectivamente.

Já os experimentos com maior gasto energético consistiram nos experimentos 5 e 7, com 4,7 V e 4,6 V, respectivamente, nos instantes finais. E nesses experimentos foram usadas corrente de 3 A, agitação de 40 RPM e 2 e 4 placas do eletrodo, respectivamente. Todos os resultados podem ser analisados no gráfico 1, abaixo.

Gráfico 1: Resultados das análises da Tensão (alumínio)

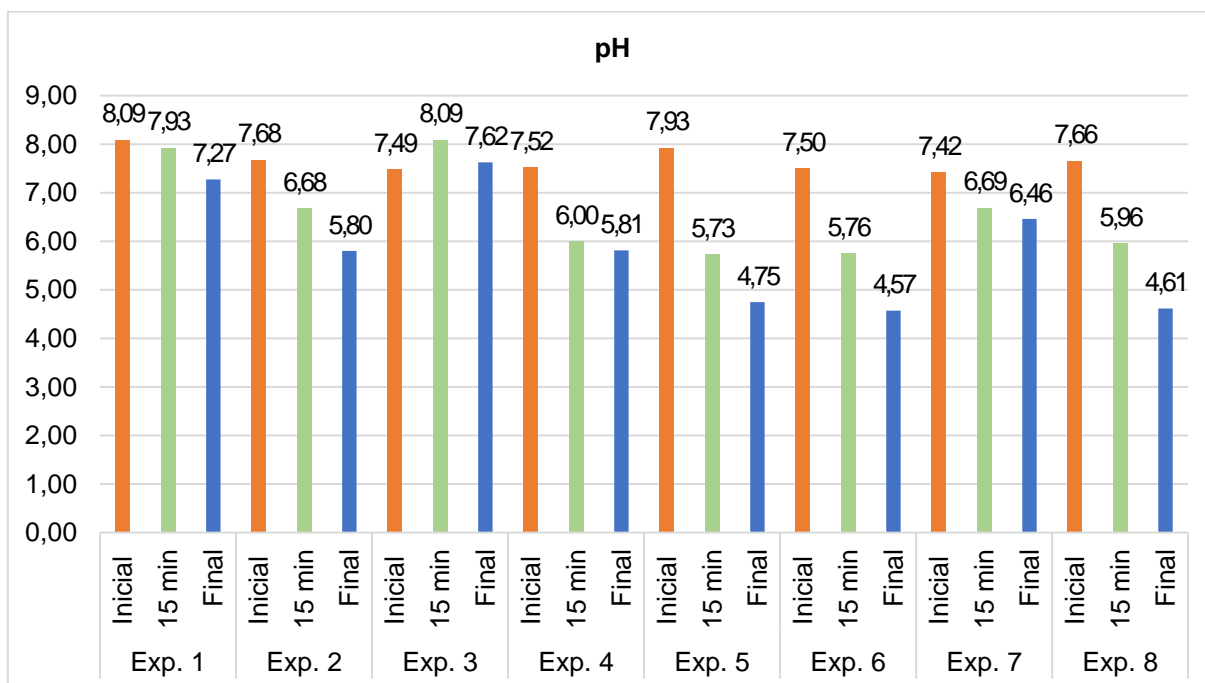


Fonte: O autor (2021)

No gráfico 2, abaixo, observa-se que em todos os experimentos realizados houve diminuição do pH da amostra, exceto na amostra 3. Indicando que as substâncias presentes na amostra propiciam uma maior oxidação da água, o que leva à formação de $H^+(aq.)$ no ânodo, conforme a equação 1 da página 16. Como a concentração desses íons aumenta na amostra há uma diminuição do pH. Contudo, nas amostras do experimento 3, houve um aumento do pH, indicando uma maior concentração de íons $OH^-(aq.)$ na amostra, onde esses íons são resultantes da redução da água no cátodo, conforme equação 2 na página 16.

Conforme recomenda-se o pH da água distribuída deve estar entre 6,0 e 9,5. Prosseguindo com a análise do gráfico 2, percebe-se que todas as amostras coletadas após experimentação (15 min e final) dos experimentos 1,3 e 7 estão dentro dos conformes para o pH recomendado, não necessitando correções e minimizando custos posteriores.

Gráfico 2: Resultados das análises de pH (alumínio)



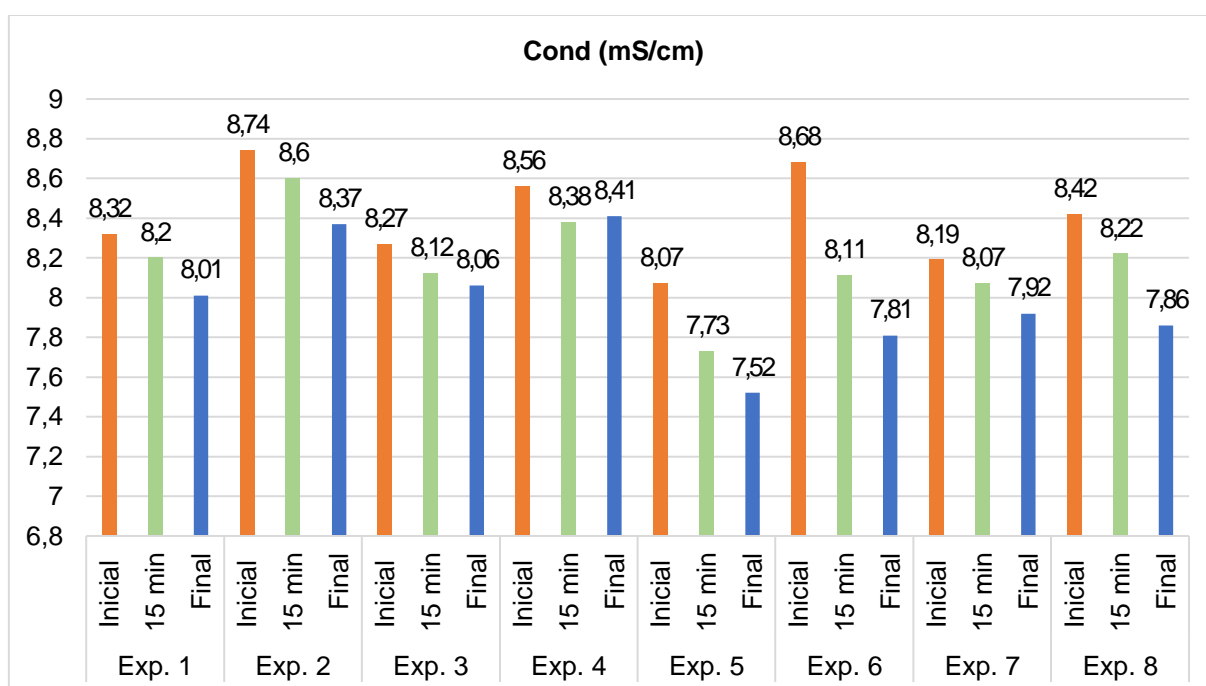
Fonte: O autor (2021)

Outro parâmetro que também foi analisado nas amostras coletadas após tratamento eletrolítico com eletrodos de alumínio foi a condutividade. Apesar de não haver padrões expressos em Portaria para a condutividade, e a condutividade não oferecer “riscos” para a saúde humana, sabe-se que uma maior condutividade da

água indica a presença de uma grande quantidade de eletrólitos dissolvidos na água, pois a água pura praticamente não conduz eletricidade.

Analisando o gráfico 3, observa-se que todos os experimentos utilizados propiciaram a redução da condutividade da amostra de água da lagoa. Fato que pode ser explicado pelo consumo dos íons presentes na água pela realização do processo de eletrólise da amostra de água, propiciado pelo tratamento eletrolítico. A experiência que propiciou menor condutividade nas amostras coletadas após o tratamento (final), foi o de número 5, com valor de 7,52 mS/cm. E o que propiciou maior condutividade, nesse mesmo intervalo, consistiu no experimento de número 4, também após 30 minutos de realização, apresentando 8,41 mS/cm.

Gráfico 3: Resultados das análises de Condutividade (alumínio)

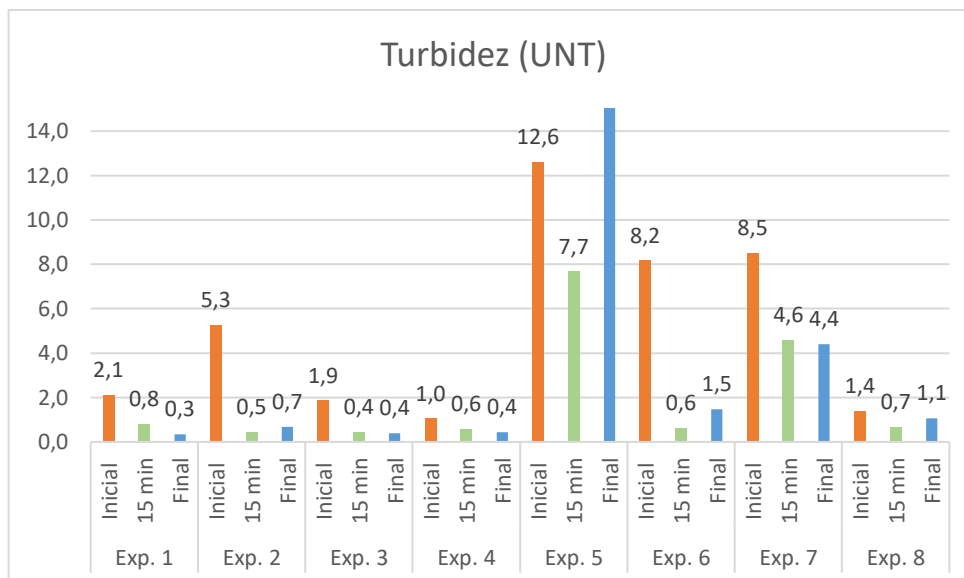


Fonte: O autor (2021)

Com relação aos resultados de turbidez pode-se concluir que a maioria dos experimentos realizados foram eficientes para remoção de sólidos em suspensão na amostra, porém no experimento 5, no tempo final, foi observado um considerável aumento da turbidez da amostra tratada de 12,6 UNT (inicial) para 345 UNT (final), indicando um aumento na concentração de coagulantes na amostra devido ao uso de uma corrente elétrica maior (3 A). A turbidez, segundo Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021, do Ministério da Saúde, deve ser de até 1 uT, após a água passar por um

processo de filtração lenta. E analisando os resultados com o uso do eletrodo de alumínio, os experimentos 1, 2, 3 e 4 foram os mais eficientes com relação aos resultados obtidos com o uso de eletrodos de aço inox e alguns atenderam aos padrões regularizados pelo Ministério da Saúde. Todos os resultados podem ser observados no gráfico 4, abaixo.

Gráfico 4: Resultados das análises de Turbidez (alumínio)

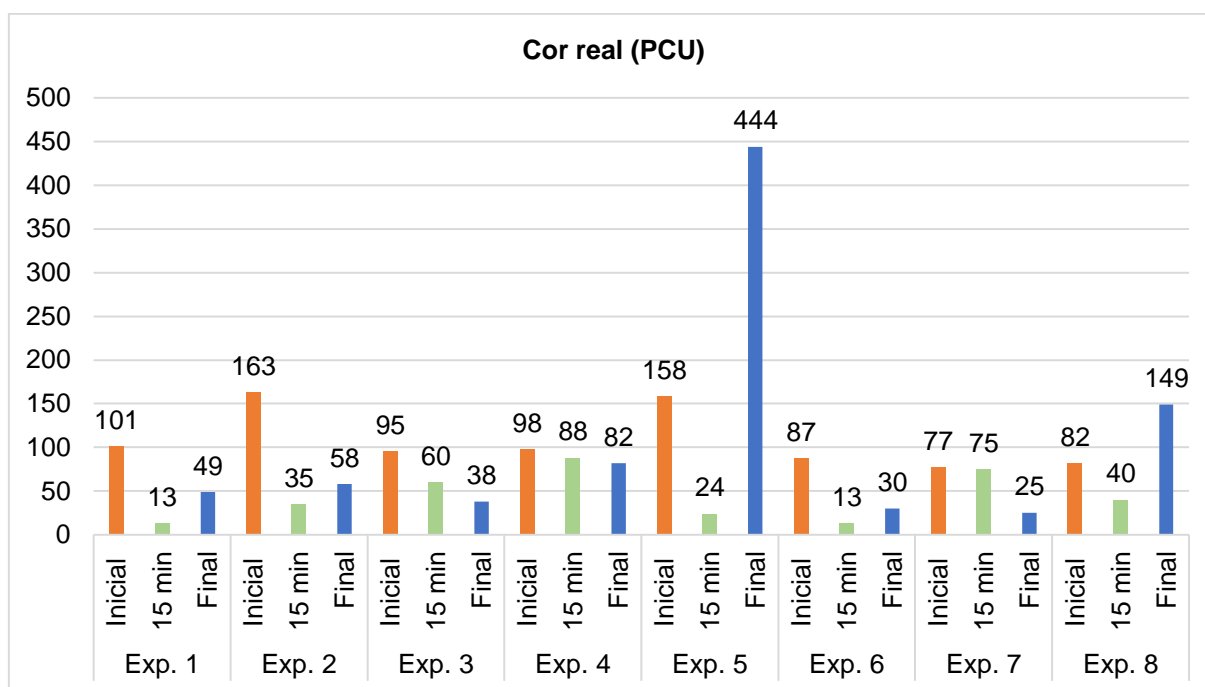


Fonte: O autor (2021)

No gráfico 5, tem-se as análises de cor real das amostras coletadas no instante inicial (0 min), 15 min, e final (30 min) de tratamento. Ao analisá-lo verifica-se que poucas amostras ficaram dentro dos padrões da Portaria nº 888, que exige que água tenha até 15 PCU para ser distribuída para a população.

Os experimentos que ficaram conforme o estabelecido pelo Ministério da Saúde foram os experimentos 1 (15min) e 6 (15 min). Em ambos os experimentos citados, o resultado foi de 13 PCU. Como visto anteriormente um grande aumento na turbidez do experimento 5 (final), na análise da cor real não foi diferente, foi uma amostra que também apresentou um resultado discrepante dos demais, com aproximadamente 444 PCU.

Gráfico 5: Resultados das análises de Cor real (alumínio)



Fonte: O autor (2021)

Após uma análise mais abrangente, o experimento mais eficiente e com menor gasto energético com o uso de eletrodo de alumínio foi o experimento 1 (15 min). Nesse experimento foi usada uma corrente de 1 A, agitação de 40 RPM, 2 placas do eletrodo e um tempo de realização de 15 min. Nesse experimento o pH da amostra coletada foi de 7,93, tensão de 2,4 V, condutividade de 8,2 mS/cm, turbidez de 0,8 UNT e cor real de 13 PCU. Todos os resultados desse experimento ficaram em conformidade com padrões exigidos pela Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021.

Com o uso dos eletrodos de alumínio houve uma formação de espuma branca na maioria dos resultados após 30 minutos de realização da eletrocoagulação-floculação-flotação. E após esse período foi observada também uma ligeira coloração esbranquiçada na amostra analisada, conforme pode ser visto na figura 17.

Figura 17: Final do experimento com alumínio



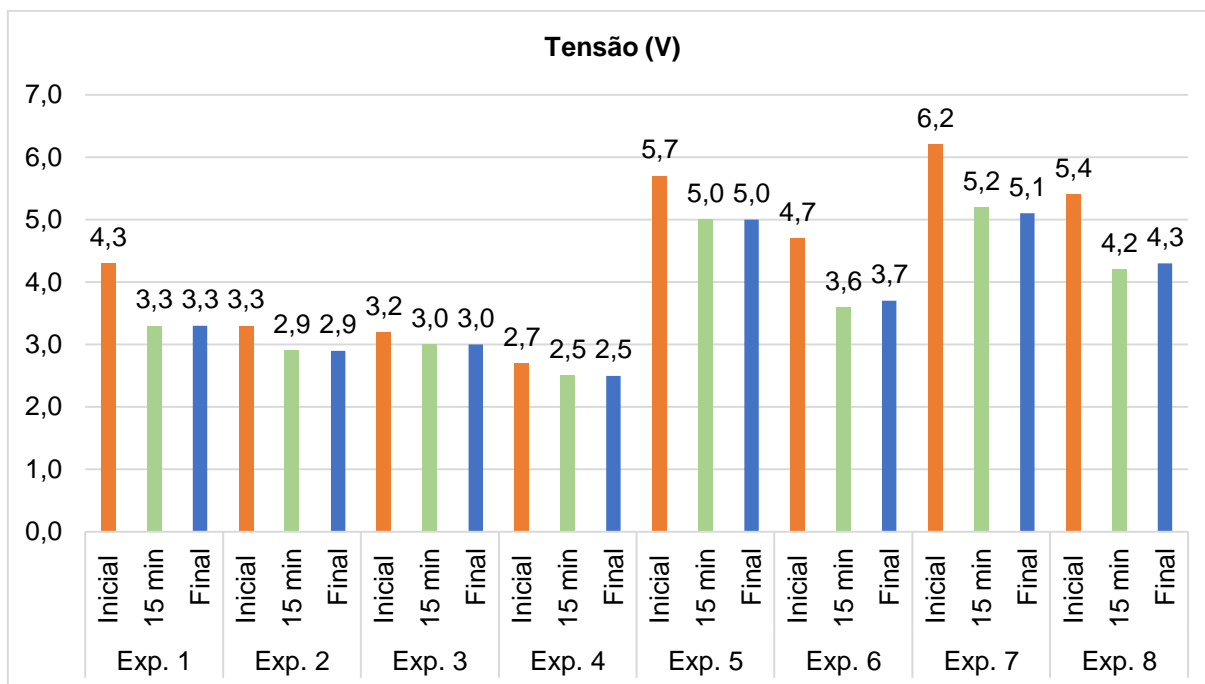
Fonte: O autor (2021)

5.2 Eletrodos de Aço Inox

Os eletrodos de aço inox tem em sua composição ferro, carbono, e no mínimo 10% de cromo. Sendo o ferro o principal responsável pela formação dos coagulantes, que são os hidróxidos derivados desse metal.

Com o uso de eletrodos em aço inox, os experimentos apresentaram maiores tensões, o que implica também em ser o de maior gasto energético para realizar o tratamento. O experimento 4 foi o que apresentou o menor consumo como o uso desse eletrodo, onde foi usada uma corrente de 1 A, rotação de 80 RPM e 4 placas dos eletrodos, com uma tensão de 2,5 V. Os demais experimentos apresentaram tensões acima de 2,9 V. No gráfico 6, todos os resultados obtidos estão expostos.

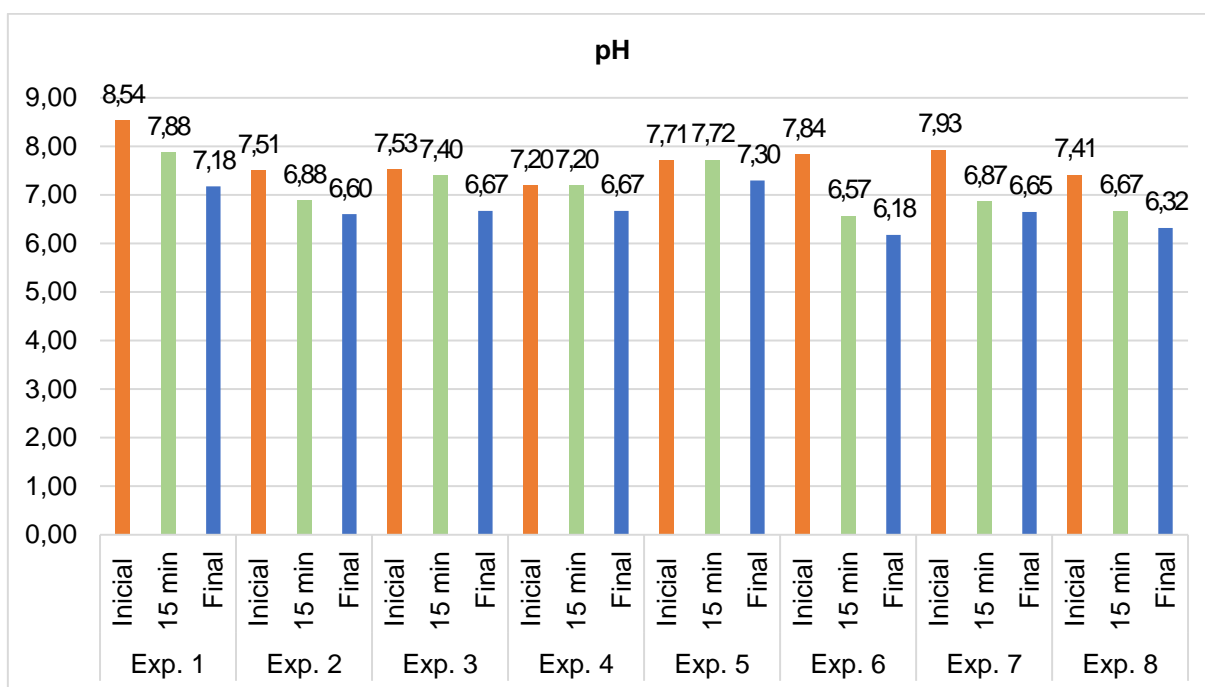
Gráfico 6: Resultados das análises de Tensão (aço inox)



Fonte: O autor (2021)

Na análise de pH, conforme gráfico 7, representado logo abaixo, pode-se inferir que nenhuma amostra apresentou pH menor que 6,0 e maior que 9,5, conforme é recomendado para as águas para o consumo humano. Dessa forma todas as amostras coletadas ficaram em conformidade e todos os experimentos realizados não prejudicam esse índice de qualidade da água. Contudo foi observada uma diminuição do pH em todos os experimentos realizados no decorrer do tempo de aplicação dos processos eletrolíticos.

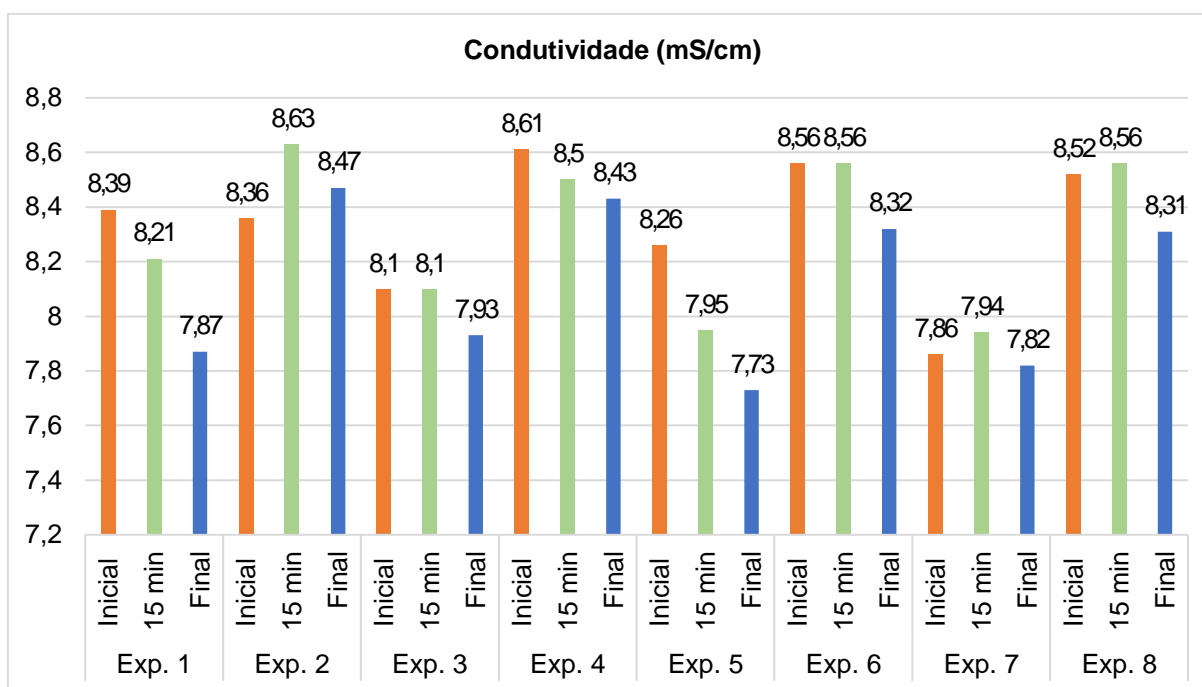
Gráfico 7: Resultados das análises de pH (aço inox)



Fonte: O autor (2021)

Analisando os resultados das análises de condutividade com o uso de eletrodos de aço inox foi observado que na maioria das amostras esse parâmetro sofreu uma redução, indicando uma diminuição de eletrólitos na amostra com a realização da eletrólise. Já no experimento 2, onde foi usado uma corrente de 1 A, 40 RPM de agitação e 4 placas de eletrodos, a condutividade foi gradativamente aumentando com o decorrer do tempo de realização do tratamento eletrolítico. O que indica um aumento de eletrólitos no meio aquoso, que pode ser decorrente da deposição de íons dos eletrodos na amostra que foi tratada. No gráfico 8 estão expressos todos os resultados da condutividade para as amostras coletadas intercaladas em intervalos de 15 min de realização.

Gráfico 8: Resultados das análises de Condutividade (aço inox)

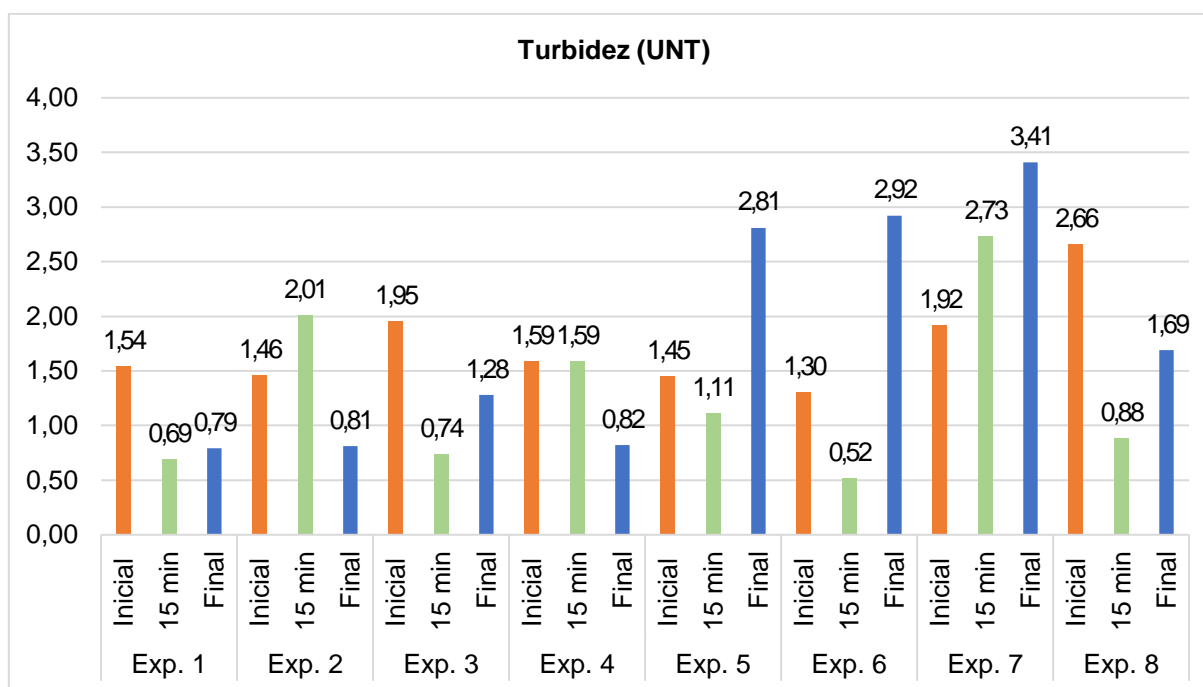


Fonte: O autor (2021)

No gráfico 9 são apresentados os resultados para análises de turbidez das amostras coletadas após os experimentos com os eletrodos de aço inox. Pode-se inferir que as amostras que ficaram em conformidade com os padrões já citados anteriormente, que consiste em 1,0 UNT, foram as resultantes dos experimentos 1 (15 min e final), Exp. 2 (final), Exp. 3 (15 min), Exp. 4 (final) Exp. 6 (15 min), Exp. 8 (15min). Isso indica que a realização de 15 min de eletrólise, já propicia uma redução eficiente no tratamento da turbidez da água da lagoa com o uso de eletrodos de aço inox. Também indica que após esse período de tratamento haverá um efeito reverso e iniciará um processo de deposição de coagulante na água, que propiciará um aumento de sua turbidez, observado pela suspensão de partículas sólidas (figura 16) e consequentemente sua contaminação.

O experimento 7, para o parâmetro da turbidez, foi o de pior resultado apresentando uma turbidez final de 3,41 UNT, que não está em conformidade com padrões exigidos pela Portaria do Ministério da Saúde. Nesse experimento é evidenciado o fato mencionado anteriormente.

Gráfico 9: Resultados das análises de Turbidez (aço inox)

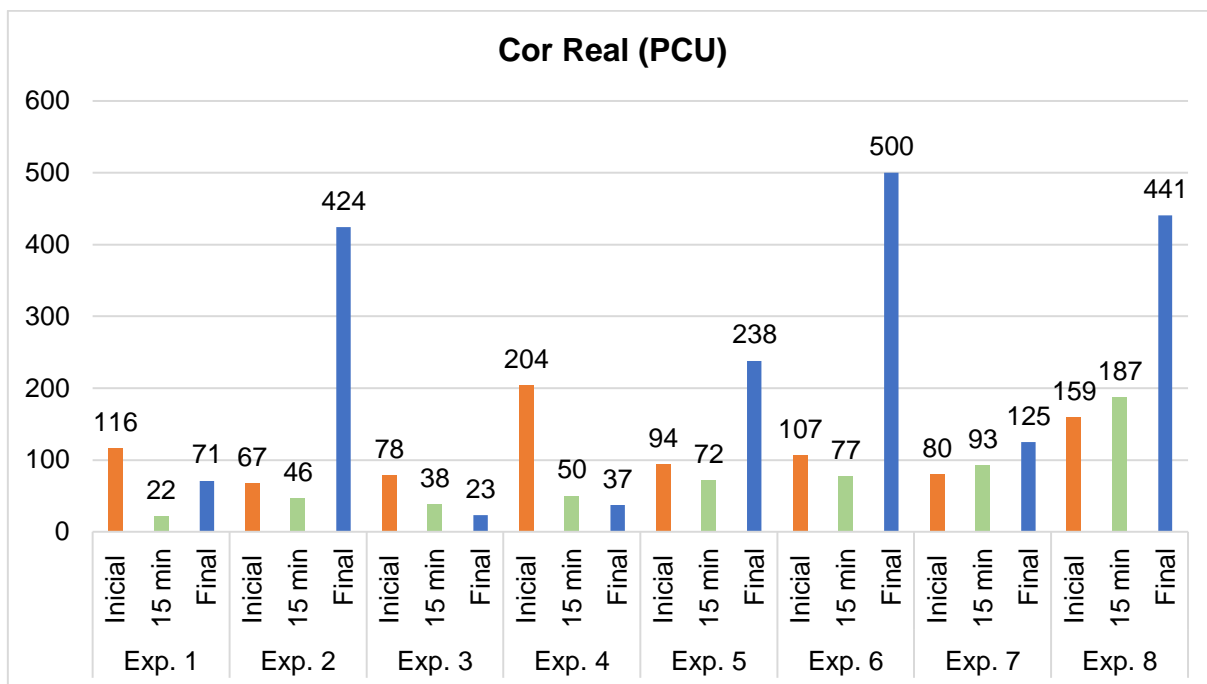


Fonte: O autor (2021)

Os resultados para cor real estão expostos no gráfico 10. Para estar em conformidade com a Portaria nº 888, a cor real deve apresentar no máximo 15 PCU. Em todas as amostras coletadas foi observado que nenhuma atendeu a esses parâmetros. O experimento mais eficiente para a redução da cor foi o experimento 1, no intervalo de 15, que propiciou uma redução de cor real de 116 PCU para 22 PCU. Os demais experimentos resultaram em um aumento da cor, sendo necessários tratamentos posteriores caso esse eletrodo fosse utilizado para realizar o tratamento eletrolítico da água da lagoa.

Nos experimentos 2, 6, e 8, houve um grande aumento na cor da amostra, no instante final (30 min), indicando uma deposição de coagulantes e partículas que propiciaram um início de uma contaminação da amostra, conforme figura 18. Seus respectivos valores foram 424 PCU, 500 PCU, e 441 PCU.

Gráfico 10: Resultados das análises de Cor Real (aço inox)



Fonte: O autor (2021)

Figura 18: Final de um experimento com aço inox



Fonte: O autor (2021)

Após análise de todos os experimentos foi observado que apesar de nenhum experimento ficar em conformidade com os parâmetros de cor com o exigido na Portaria, o mais eficiente também foi o experimento 1 (15min), assim como os resultados observados com o uso de eletrodo alumínio. Nesse experimento foi usada uma corrente de 1 A, agitação de 40 RPM, 2 placas do eletrodo e um tempo de realização de 15 min. Os resultados obtidos após análises foi um pH de 7,88, condutividade de 8,1 mS/cm, turbidez de 0,69 UNT, cor real de 22 PCU, e tensão de 3,3 V.

Apesar do experimento 6 (15 min) apresentar uma turbidez menor, ele não foi considerado o mais eficiente, pois o padrão de cor desse experimento está acima do apresentado no experimento 1 (15 min). Pode-se observar também que o experimento 1 (15min) também não foi o de menor gasto energético, sendo o experimento 4 (15min) o que apresentou menor valor, 2,9 V, porém assim como o caso anterior ele foi o mais eficiente considerando os resultados de todos os parâmetros.

5.3 Experimento Otimizado

Dentre todos os experimentos realizados, foi analisado qual foi o mais eficiente para realizar o tratamento da água levando em consideração os parâmetros estabelecidos pela Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021, no que diz respeito à turbidez e cor, assim como seu custo de operação.

Dentre os 16 experimentos realizados, o que propiciou uma melhor eficiência foi o experimento 1 (15 min) com o uso de eletrodos de alumínio. Nesse experimento foi utilizada uma corrente de 1 A, agitação de 40 RPM, 2 placas de eletrodos de alumínio com medidas iguais a 5 cm de largura, 25 cm de altura útil (que ficará submersa na água) e 0,3 cm de espessura, perfazendo uma área total de 275 cm² por placa, e um distanciamento entre as placas de 0,8 cm.

Diante disso, o experimento 1 foi refeito, sendo considerado o experimento otimizado para o tratamento, repetindo todos os parâmetros para sua realização, porém alterando o tempo de experimento, pois foi observado que após 15 min de experimento havia um processo reverso do tratamento, onde percebeu-se o início da contaminação da água, o que foi evidenciado pelo aumento da turbidez e cor real da

amostra coletada aos 30 min. Os instantes utilizados no experimento otimizado foram: inicial (0 min), 7,5 min e final (15 min).

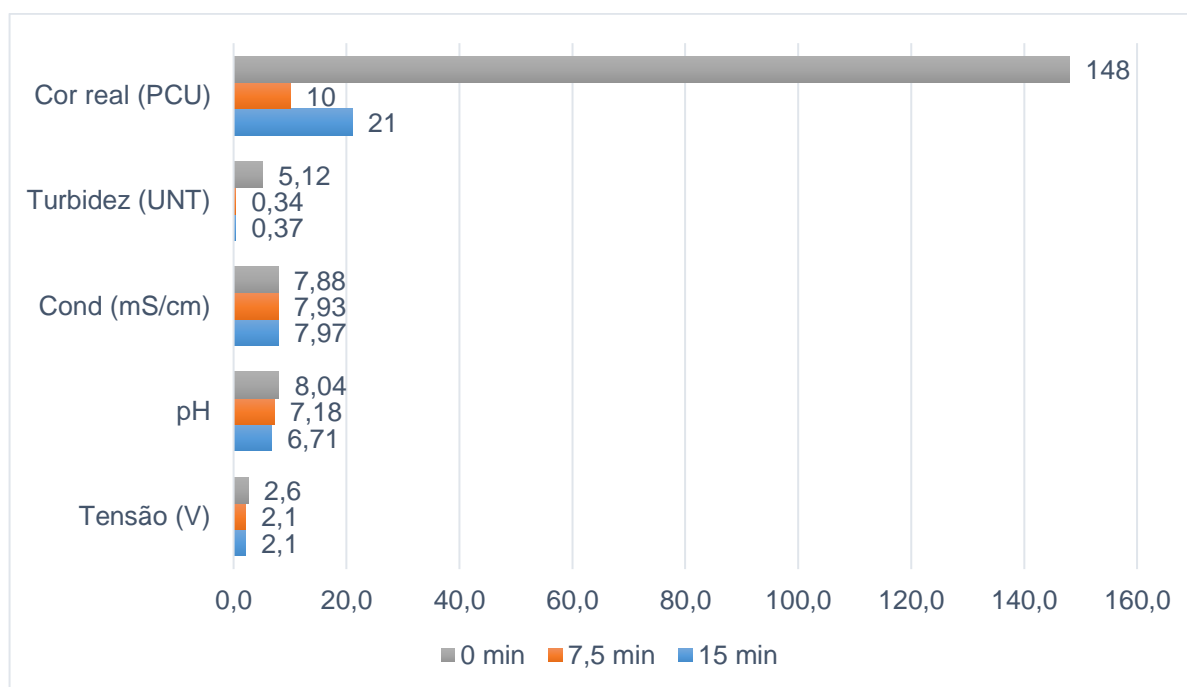
O gráfico 11 abaixo foi confeccionado a partir dos resultados das análises do experimento otimizado. Conforme o gráfico observa-se que a cor real reduziu de 148 PCU para 10 PCU, no instante de 7,5 min, e aumentando para 21 PCU no instante de 15 min. Isso evidencia que para realização do tratamento eletrolítico da água da lagoa, a realização de 7,5 min de experimento foi suficiente para ficar em conformidade com padrões exigidos pela Portaria de Consolidação, que consiste em 15 PCU.

No que tange a turbidez, o mesmo fato foi observando, havendo uma redução de 5,12 UNT para 0,32 UNT, no instante de 7,5 min, e para 0,37 UNT no instante de 15 min de tratamento, assegurando uma melhor eficiência do tratamento no tempo total de 7,5 min. Segundo a Portaria do Ministério da Saúde, a turbidez deve ser até atingir no máximo 1,0 UNT, portanto, ambos os resultados das análises estão em conformidade.

Já em relação a condutividade houve um leve aumento na concentração de íons na amostra que passou de 7,88 mS/cm para 7,93 mS/cm no instante de 7,5 min, e 7,97 mS/cm no instante de 15 min de experimentação, indicando um leve aumento na concentração de eletrólitos na amostra.

O pH é outro parâmetro importante e estabelecido em norma pela Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017, onde são estabelecidos os limites de 6,5 a 9,0 para o pH da água distribuída para as residências. E nesse experimento houve redução do pH de 8,04 para 7,93, no instante de 7,5 min, e para 6,71 no instante de 15 min. Todos os resultados podem ser analisados no gráfico 11 abaixo.

Gráfico 11: Resultados Experimento Otimizado



Fonte: O autor (2021)

Dessa forma, após a análise do experimento otimizado foi constatado que um período de 7,5 min de realização de experimento é o ideal para tratamento da água coletada da lagoa. Observando a tensão empregada nesse tratamento, que foi de 2,1 V, foi realizado o cálculo do gasto energético para tratamento dos 2 L de água feito no experimento, conforme equação 2 abaixo.

Equação 4: Consumo Energético ECC (Wh/m³)

$$ECC = \frac{i \times t \times U}{V}$$

Fonte: O autor (2021)

Como no experimento 1 (7,5min) a corrente utilizada foi de 1,0 A, então $i = 1,0$ A; o tempo empregado foi de 7,5 min, $t = 0,125$ h; a tensão aplicada foi de 2,1 V, $U = 2,1$ V; e o volume de água utilizado foi de 2 L, $v = 0,002$ m³. Aplicando os dados na fórmula obteremos:

Equação 5: Consumo Energético no tratamento eletrolítico

$$ECC = \frac{1,0 \times 0,125 \times 2,1}{0,002} = 131,25 \text{ Wh/m}^3$$

Fonte: O autor (2021)

Dessa forma ao realizar o tratamento eletrolítico empregando parâmetros do experimento 1 e o tempo de 7,5 min foram gastos 131,25 Wh/m³ de água. Ao multiplicar esse valor pelo preço do kWh vigente atualmente no estado Ceará, que segundos dados da Enel está com o valor de R\$ 0,73078 por kWh, vigente para a bandeira de escassez hídrica para a classe B1 - residencial normal, de outubro de 2021, obtém-se:

Equação 6: Consumo energético em reais

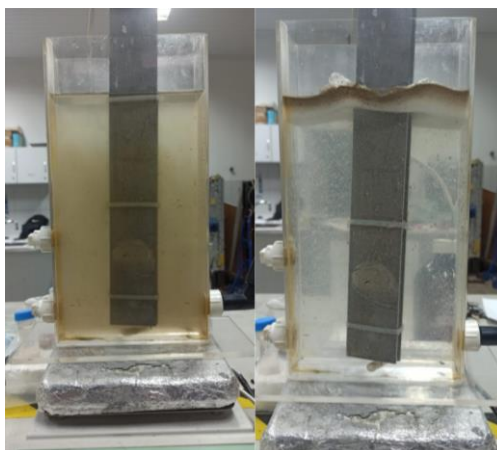
$$\text{Consumo energético} = 131,25 \times 10^{-3} \times 0,73078 = \text{R\$ } 0,0959/\text{m}^3$$

Fonte: O autor (2021)

Sendo, portanto, necessários R\$ 0,0959 para realizar o tratamento eletrolítico de 1 m³ de água da lagoa, usando os mesmos parâmetros empregados no experimento otimizado. Onde, segundo dados da Companhia de Água e Esgoto de Ceará (Cagece), o valor para o m³ vigente a partir de 29 de janeiro de 2021 é de R\$ 4,52/m³ para a categoria Residencial Normal.

Na figura 19 pode ser observado como a água da lagoa se encontrava e como ficou após a realização do processo eletrolítico otimizado. É evidente a mudança da coloração e flotação das partículas que estava suspensas na água.

Figura 19: Antes e depois da realização do experimento otimizado

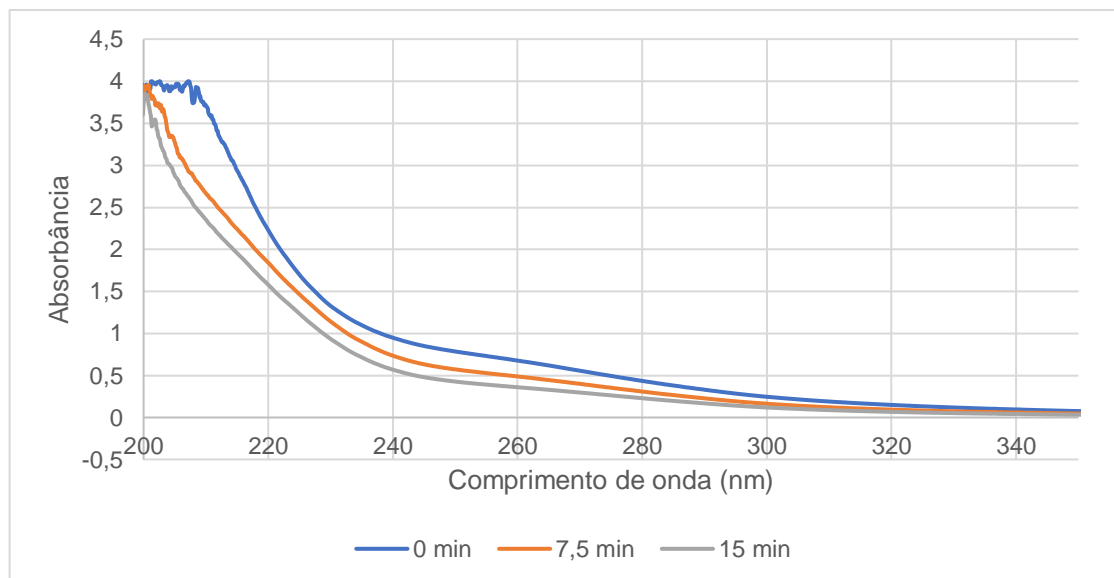


Fonte: O autor (2021)

Para análise posterior do experimento otimizado foi realizada a sua filtração com o uso de filtro para seringa.

Os resultados da análise do UV-VIS estão representados no gráfico 12. Onde ocorre a análise da amostra coletada inicialmente (0 min), a amostra coletada no instante de 7,5 min, e a amostra coletada no término do experimento (15 min).

Gráfico 12: Análise de UV-VIS



Fonte: O autor (2021)

Ao analisar os resultados plotados no gráfico verifica-se que houve uma redução gradativa da absorbância, nas amostras coletadas do experimento otimizado, de acordo com o tempo de realização do processo eletrolítico. Isso indica que houve uma redução da concentração de substâncias que absorvem a radiação emitida pelo equipamento. Analisando um comprimento de onda específico de 456 nm (o mais utilizado para esse tipo de análise), é observado uma absorbância de 0,009 para a amostra inicial (0min), 0,003 para a amostra de 7,5 min, e 0,001 para a amostra final (15 min). Indicando, portanto, uma redução de 66,7% de absorção da radiação da amostra inicial (0 min) para a amostra coletada aos 7,5 min. E, uma redução de 88,9% da amostra coletada inicialmente (0min) para a amostra final (15 min).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do processo eletrolítico no tratamento da água de lagoa é promissor no mercado e pouco disseminado, porém, como pôde ser visto foi uma alternativa e com resultados consideráveis para ser utilizado em uma das etapas do tratamento de água bruta. Para sua realização não há necessidade de aquisição de reagentes químicos, pois, nesse tratamento os impulsadores para que o processo ocorra são os próprios eletrodos utilizados, que são reativos e produzem os coagulantes necessários.

Após a realização das análises o experimento de melhor desempenho para adequação aos padrões estabelecidos pela Portaria do Ministério da saúde foi o de número 1, com 15 minutos de realização. Nesse experimento foi empregada uma corrente de 1 A, agitação de 40 RPM e 2 placas de alumínio. Com isso foi realizada uma experiência otimizada com novos tempos de coleta, onde foi observado que no tempo de eletro-coagulação-floculação-flotação de 7,5 minutos o processo ocorre de forma mais eficiente.

Os resultados para os parâmetros analisados para o experimento otimizado (7,5 min) foram: uma redução da cor real de 148 PCU para 10 PCU, que corresponde a uma redução de 93,24%; redução da turbidez de 5,12 UNT para 0,34 UNT, que corresponde a uma redução de 93,35%; aumento da condutividade de 7,88 mS/cm para 7,93 mS/cm, que corresponde a um aumento 0,63%; redução do pH de 8,04 para 7,18, que corresponde a uma redução de 10,70%; e um gasto energético de 131,25 Wh/m³, o que proporcionaria um gasto de R\$ 0,0959 em energia elétrica, para realizar o tratamento de 1 m³ de água da lagoa. E os resultados da análise de UV-VIS confirmaram a eficiência do tratamento e conseqüentemente a redução da concentração de compostos orgânicos observado pela redução de 66,7% da absorbância no intervalo de tempo analisado (7,5 min).

Todos os resultados obtidos com esse experimento ficaram em conformidade com o estabelecido pela Portaria de Consolidação, que exige uma turbidez de até 1,0 UNT, uma cor real de até 15 PCU, e recomenda um pH de 6,0 a 9,5.

Outras análises deveriam ser realizadas para que água tratada pudesse ser distribuída para o consumo humano, onde elas também são regidas pela Portaria Nº 888, de 4 de maio de 2021, porém, não foi possível a realização dessas análises.

Elas podem ser realizadas futuramente, sendo uma proposta de continuidade a ser realizada no trabalho. Além disso, há também como possibilidade de melhoria o uso de energia solar para a realização do tratamento, como também a possibilidade de montar reatores portáteis com o uso de pilhas ou baterias para realizar a eletrocoagulação-floculação-flotação em locais remotos que não possuem distribuição de energia elétrica, podendo assim atender à população carente que reside em áreas rurais.

Portanto, considerando os resultados obtidos em laboratório, o emprego do tratamento eletrolítico para realizar tratamento de água de lagoa foi viável e propiciou a obtenção de resultados satisfatórios, podendo ser uma alternativa interessante a ser empregada em umas das etapas do tratamento da água.

REFERÊNCIAS

BRACHER, Gustavo Holz. **Análise de desempenho de um sistema de eletrocoagulação-flotação para tratamento de esgoto doméstico visando reúso**. 2018. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria (Rs), 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/15264>. Acesso em: 29 ago. 2021.

BRANDÃO, André Schramm et al. **Análise de viabilidade técnica do uso de água residuária como água de amassamento para concreto**. In: SILVA, Helenton Carlos da (org.). Engenharia Ambiental e Sanitária: interfaces do conhecimento 2. Ponta Grossa (Pr): Atena Editora, 2019. p. 218-230. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/post-artigo/23611>. Acesso em: 28 ago. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. **Portaria GN/MS Nº 888, de 4 de maio De 2021**. Brasília: 2021. Disponível em: < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>>. Acesso em: 14 dez. 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano**. Brasília: Ministério da Saúde, 2006. 212 p. Disponível em: <https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/vigilancia_controle_qualidade_agua.pdf>. Acesso em: 12 set. 2021.

BROWN, Theodore L. et al. **Química: A ciência central**. 13. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2016.

GARCIA, T. V. **Remoção de algas através da eletroflotação: tratamento eletrolítico seguido de filtração direta no tratamento de água de abastecimento**. 2002. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/83184>. Aceso em 12 set. 2021.

IBANEZ, Jorge G. **Saneamento Ambiental por Métodos Eletroquímicos**. Química Nova na Escola, [s. l], v. 1, n. 15, p. 62-65, maio 2002. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc15/v15a10.pdf>. Acesso em: 08 set. 2021.

MAIA, L. G. C. **Estudo do processo de eletrocoagulação/floculação aplicado ao polimento de efluente doméstico**. 2014. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

NETO, Sidney Aquino de *et al.* **Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em química**. Química Nova [online]. 2011, v. 34, n. 8., pp. 1468-1471. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0100-40422011000800030>>. Acesso em: 07 set. 2021.

Organização das Nações Unidas – ONU (2015). **Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. Brasília. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6>>. Acesso em: 12 set. 2021.

PESSOA, Germana de Paiva. **Estudo da remoção de cor de efluente têxtil por eletrocoagulação**. 2008. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/16720>. Acesso em: 12 set. 2021.

RIBEIRO, Jefferson Pereira. **Tratamento de efluentes têxteis por processo eletrolítico com corrente direta pulsada em escala laboratorial e piloto visando o reuso no processo produtivo**. 2017. 172 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/29308>>. Acesso em: 28 ago. 2021.

SALVADOR, Diego Leonardo *et al.* **Estudos sobre Eletrocoagulação no Tratamento de Efluentes em Águas Salobras**. SHEWC, Vila Real (Portugal), v. 1, n. 17, p. 130-134, jul. 2017. Disponível em: <<http://www.copec.eu/shewc2017/proc/works/31.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2021.

SINGEP, 07., 2018, São Paulo. **Água de reuso utilizada como medida alternativa para a substituição da água potável no processo de produção de concreto.** São Paulo: Singep, 2018. Disponível em: <http://www.singep.org.br/7singep/resultado/190.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2021.

SINOTI, A. L.L. **Processo eletrolítico no tratamento de esgotos sanitários: estudo da sua aplicabilidade e mecanismos associados.** 2004. 154p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

VENEU, Diego Macedo et al. **Tratamento de água eutrofizada através dos processos de pré-oxidação, coagulação e floculação.** Engevista, Rio de Janeiro, v. 2, n. 17, p. 175-186, jun. 2015. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/download/9016/6487>. Acesso em: 28 ago. 2021.

**APÊNDICE A – CAPTURA DE TELA DA PLANILHA DOS RESULTADOS
COLETADOS DAS ANÁLISES PARA ELETRODOS DE ALUMÍNIO**

								Resultado	
								Alumínio	
		Tensão (V)	pH	Cond (mS/cm)	Turbidez (UNT)	Cor (PCU)	COT	UV-Vis	
Exp. 1	Inicial	3,1	8,09	8,32	2,09	101			
	15 min	2,4	7,93	8,2	0,80	13			
	Final	2,3	7,27	8,01	0,34	49			
Exp. 2	Inicial	2,7	7,68	8,74	5,25	163			
	15 min	2,1	6,68	8,6	0,45	35			
	Final	2,1	5,80	8,37	0,68	58			
Exp. 3	Inicial	2,3	7,49	8,27	1,85	95			
	15 min	2,1	8,09	8,12	0,43	60			
	Final	2,0	7,62	8,06	0,38	38			
Exp. 4	Inicial	2,0	7,52	8,56	1,04	98			
	15 min	2,0	6,00	8,38	0,58	88			
	Final	2,0	5,81	8,41	0,44	82			
Exp. 5	Inicial	5,2	7,93	8,07	12,60	158			
	15 min	4,7	5,73	7,73	7,66	24			
	Final	4,7	4,75	7,52	345,00	444			
Exp. 6	Inicial	3,7	7,50	8,68	8,16	87			
	15 min	3,4	5,76	8,11	0,62	13			
	Final	3,4	4,57	7,81	1,48	30			
Exp. 7	Inicial	4,6	7,42	8,19	8,49	77			
	15 min	4,5	6,69	8,07	4,59	75			
	Final	4,6	6,46	7,92	4,41	25			
Exp. 8	Inicial	3,7	7,66	8,42	1,37	82			
	15 min	3,4	5,96	8,22	0,66	40			
	Final	3,4	4,61	7,86	1,06	149			
Otimizado	0 min	2,6	8,04	7,88	5,12	148			
	7,5 min	2,1	7,18	7,93	0,34	10			
	15 min	2,1	6,71	7,97	0,37	21			

