



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS  
ENGENHARIA CIVIL**

**GERARDO OLIVEIRA MAGALHÃES NETO**

**ELETROFLOTAÇÃO, ELETROCOAGULAÇÃO E ELETRO-OXIDAÇÃO  
APLICADA À CLARIFICAÇÃO DE ÁGUAS URBANAS CONTAMINADAS**

**FORTALEZA**

**2020**

GERARDO OLIVEIRA MAGALHÃES NETO

ELETROFLOTAÇÃO, ELETROCOAGULAÇÃO E ELETRO-OXIDAÇÃO APLICADA À  
CLARIFICAÇÃO DE ÁGUAS URBANAS CONTAMINADAS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao curso de Engenharia Civil do  
Centro Universitário Christus, como requisito  
parcial para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eliezer Fares Abdala  
Neto.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Centro Universitário Christus - Unichristus  
Gerada automaticamente pelo Sistema de Elaboração de Ficha Catalográfica do  
Centro Universitário Christus - Unichristus, com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M188e    MAGALHÃES NETO, GERARDO OLIVEIRA.  
          ELETROFLOTAÇÃO, ELETROCOAGULAÇÃO E ELETRO-  
          OXIDAÇÃO APLICADA À CLARIFICAÇÃO DE ÁGUAS URBANAS  
          CONTAMINADAS / GERARDO OLIVEIRA MAGALHÃES  
          NETO. - 2020.  
          66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro  
Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil,  
Fortaleza, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Eliezer Fares Abdala Neto.

1. Clarificação. 2. Processo eletrolítico. 3. . Zonas Lacustres. I.  
Título.

CDD 624

GERARDO OLIVEIRA MAGALHÃES NETO

ELETROFLOTAÇÃO, ELETROCOAGULAÇÃO E ELETROOXIDAÇÃO APLICADA À  
CLARIFICAÇÃO DE ÁGUAS URBANAS CONTAMINADAS

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado ao curso de Engenharia Civil do  
Centro Universitário Christus, como requisito  
parcial para obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Eliezer Fares Abdala  
Neto.

Aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Eliezer Fares Abdala Neto  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

---

Prof. Me. José Willington Gondim Oliveira  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

---

Prof. Dra. Elayne Valério Carvalho  
Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

FORTALEZA

2020

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus e aos meus familiares, em especial minha mãe e minha avó, que não mediram esforços para que eu pudesse concluir mais esse ciclo em minha vida.

À coordenação do curso de Engenharia Civil da Unichristus por fornecer apoio durante a realização dos ensaios previstos.

Ao Prof. Dr. Eliezer Fares Abdala Neto por não medir esforços nas orientações diante das dificuldades encontradas durante a realização do trabalho, bem como na elaboração dos experimentos.

## RESUMO

O processo eletrolítico vem se destacando como uma alternativa viável para a clarificação de águas provenientes de mananciais lacustres que apresentam algum grau de contaminação. Esse problema é geralmente ocasionado pelo despejo inadequado de efluentes domésticos de habitantes locais e impacta diretamente na qualidade dessas águas. Este trabalho teve como objetivo propor experimentos realizados em um reator, concebido pelo autor, onde analisou-se o tratamento de uma água que recebe esses efluentes domésticos. Foi promovido três disposições diferentes de eletrodos dentro do reator de acrílico, em que foram aplicados uma fonte de corrente contínua de 12 V. Os experimentos foram realizados em batelada, medindo os parâmetros de pH, turbidez e condutividade elétrica em intervalos de tempo de 3 minutos durante o funcionamento do equipamento. As amostras de água eram comparadas em termos de seus valores com a legislação vigente. Os experimentos com eletrodos de forma simultânea se demonstraram mais eficiente para os parâmetros analisados. Com base nos experimentos foi possível obter condições ótimas de tratamento para clarificação da água sendo essas condições atingidas para uma condutividade elétrica menor que 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  obtendo até 93% de remoção de turbidez e pH próximo à 9,0 na disposição mais eficiente dos eletrodos para um tempo de 18 minutos de implementação do processo.

**Palavras-chave:** Clarificação. Processo eletrolítico. Zonas Lacustres.

## ABSTRACT

The electrolytic process has been highlighted as a viable alternative for the clarification of waters coming from lake sources that present some degree of contamination. This problem is usually caused by the inadequate discharge of domestic effluents from local inhabitants and directly impacts the quality of these waters. This work aimed to propose experiments carried out in a reactor, designed by the author, where the treatment of a water that receives these domestic effluents was analyzed. The provision of three different electrode arrangements within the reactor was promoted, in which a 12 V direct current source was applied. The experiments were carried out in batches, measuring the parameters of pH, turbidity and electrical conductivity at intervals of 3 min during equipment operation. The water samples were compared in terms of their values with the current legislation. The experiments with electrodes simultaneously proved to be more efficient for the analyzed parameters. Based on the experiments, it was possible to obtain optimal treatment conditions for water clarification, these conditions being reached for an electrical conductivity less than 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , obtaining up to 93% of turbidity removal and pH close to 9.0 in the most efficient electrode arrangement. for a time of 18 minutes of implementation of the process.

**Keywords:** Clarification. Electrolytic Process. Urban Lagoons.

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

A	Ampéres
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHA	Ácidos Haloacéticos
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CC	Câmara de Carga
CE	Ceará
DF	Dupla Filtração
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FA	Filtro Ascendente
FDA	Filtração Direta Ascendente
FDD	Filtração Direta Descendente
FL	Filtração Lenta
HAN	Haloacetoneitrilas
IET	Índice de Estado Trófico
IETC	Índice de Estado Trófico de Carson
IETL	Índice de Estado Trófico de Lamperalli
IETT	Índice de Estado Trófico de Tolledo
LABOSAN	Laboratório de Saneamento
MON	Matéria Orgânica Natural
MS	Ministério da Saúde
PCR	Portaria de Consolidação
pH	Potencial Hidrogeniônico
PAC	Policloreto de Alumínio
POA	Processos Oxidativos Avançados
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
TDS	Teor de Sólidos Dissolvidos
THM	Trihalometanos
UNT	Unidades Nefelométricas de Turbidez
V	Volts

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fórmulas estruturais dos trihalometanos.....	19
Figura 2 – Filtros descendentes .....	25
Figura 3 – Etapa de Desinfecção final na ETA Gavião.....	26
Figura 4 – Vista aérea da principal ETA de Fortaleza (ETA Gavião) .....	27
Figura 5 – Fluxograma do processo de tratamento da ETA Gavião .....	28
Figura 6 - Filtração descendente aplicada a ETA Gavião .....	29
Figura 7 – Esquema de uma Instalação de Dupla Filtração .....	30
Figura 8 – Esquemática do processo eletrolítico .....	33
Figura 9 – Diagrama de distribuição dos compostos monoméricos de Al dependendo do pH. .....	36
Figura 10 – Vias da remoção de poluentes no processo eletroquímico; (a) oxidação direta; e (b) oxidação indireta. ....	37
Figura 11 – Fluxograma da metodologia da pesquisa .....	38
Figura 12 – Localização geográfica da Lagoa de Parangaba (Fortaleza/CE).....	39
Figura 13 – Esboço do experimento utilizado na pesquisa: 1- Conjunto de eletrodos, 2 - Torneira de coleta, 3 - Suporte e 4 - Multímetro (voltímetro e amperímetro). ....	40
Figura 14 – Conjuntos de eletrodos utilizados nos ensaios. ....	41
Figura 15 – Sistema eletrolítico implementado: 1- Fonte de energia, 2- Fonte estabilizadora, 3 - Multímetros (voltímetro e amperímetro), 4 – Entrada dos eletrodos e amostras, 5 – Torneira de coleta e 6- Tubos de Falcon. ....	48
Figura 16 – Gráfico comparativo dos resultados obtidos para o pH .....	56
Figura 17 – Gráfico comparativo dos resultados obtidos para a Turbidez.....	57
Figura 18 – Gráfico comparativo dos resultados obtidos para a Condutividade.....	58

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Representação dos Estados Tróficos dos Mananciais .....	21
Quadro 2 – Vantagens e Desvantagens da aplicação de Filtração Direta .....	29
Quadro 3 – Tipos de Processos Oxidativos Avançados .....	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores do potencial padrão de redução ( $E^{\circ}$ ) de espécies oxidantes .....	32
Tabela 2 – Percentual da composição química do aço inoxidável 304 utilizado nos experimentos.....	40
Tabela 3 – Percentual da composição química do alumínio 1050 utilizado nos experimentos	41
Tabela 4 – Características físico-químicas do efluente utilizado no estudo.....	46
Tabela 5 – Resultados obtidos com eletrodo de Alumínio.....	50
Tabela 6 – Condutividade elétrica e gasto energético para o alumínio.....	51
Tabela 7 – Resultados obtidos com eletrodo de Aço Inox .....	52
Tabela 8 – Condutividade elétrica e gasto energético para o tratamento com Aço Inox .....	53
Tabela 9 – Resultados obtidos com aplicação dos eletrodos mistos .....	54
Tabela 10 – Condutividade elétrica e gasto energético para o tratamento com Alumínio e Aço Inox.....	55
Tabela 11 – Comparativo entre os gastos energéticos referentes a cada experimento realizado com os diferentes tipos de eletrodos.....	59
Tabela 12 – Valores de Gastos e Custos obtidos para os melhores resultados alcançados pelos eletrodos estudados.....	60

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos.....</b>	<b>16</b>
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	16
1.1.2	<i>Objetivos Específicos .....</i>	16
<b>1.2</b>	<b>Estrutura do Trabalho.....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Principais parâmetros de qualidade da água.....</b>	<b>17</b>
2.1.1	<i>Sólidos.....</i>	17
2.1.2	<i>Turbidez.....</i>	18
2.1.3	<i>Cor .....</i>	18
2.1.4	<i>Condutividade elétrica .....</i>	19
2.1.5	<i>Potencial hidrogeniônico (pH).....</i>	19
2.1.6	<i>Cloretos .....</i>	19
<b>2.2</b>	<b>Eutrofização .....</b>	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>Controle de qualidade das águas de abastecimento .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4</b>	<b>Etapas do tratamento de água para consumo humano.....</b>	<b>23</b>
2.4.1	<i>Pré-oxidação .....</i>	23
2.4.2	<i>Coagulação .....</i>	24
2.4.3	<i>Floculação.....</i>	24
2.4.4	<i>Decantação .....</i>	25
2.4.5	<i>Filtração.....</i>	25
2.4.6	<i>Desinfecção .....</i>	26
<b>2.5</b>	<b>Tecnologias de tratamento de água para consumo humano.....</b>	<b>26</b>
2.5.1	<i>Filtração direta descendente.....</i>	28
2.5.2	<i>Dupla filtração .....</i>	30
<b>2.6</b>	<b>Tecnologia não convencional aplicado ao tratamento de águas.....</b>	<b>30</b>
<b>2.7</b>	<b>Processo eletrolítico .....</b>	<b>32</b>
2.7.1	<i>Eletrocoagulação .....</i>	34
2.7.2	<i>Eletroflotação.....</i>	36
2.7.3	<i>Eletroxidação .....</i>	36
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1</b>	<b>Classificação do método.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2</b>	<b>Água de estudo.....</b>	<b>39</b>

<b>3.3</b>	<b>Setup do experimento</b>	<b>39</b>
<b>3.4</b>	<b>Procedimento experimental</b>	<b>43</b>
3.4.1	<i>Descrição dos experimentos</i>	43
3.4.2	<i>Caracterização físico-química da água estudada</i>	43
<b>3.5</b>	<b>Avaliação econômica da energia consumida pelo processo aplicado</b>	<b>44</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>46</b>
<b>4.4</b>	<b>Caracterização da água de estudo</b>	<b>46</b>
<b>4.5</b>	<b>Concepção do reator eletrolítico</b>	<b>47</b>
<b>4.6</b>	<b>Resultados da eficiência de tratamento utilizando eletrodos de alumínio</b>	<b>49</b>
<b>4.7</b>	<b>Resultados de eficiência de tratamento utilizado eletrodos de aço inox</b>	<b>51</b>
<b>4.8</b>	<b>A eficiência de tratamento utilizando eletrodos de alumínio e aço inox</b>	<b>53</b>
<b>4.9</b>	<b>Comparação entre os resultados obtidos</b>	<b>55</b>
<b>4.10</b>	<b>Avaliação dos custos de implementação dos processos</b>	<b>58</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>61</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios sanitários da sociedade brasileira é a falta de coleta, tratamento e disposição final adequada dos esgotos domésticos urbanos. Segundo o Instituto Trata Brasil (2017), no Brasil do total de esgoto produzido por meio da água consumida pela população, 46% é efetivamente tratado. Ainda de acordo com o Trata Brasil (2017), esse índice é ainda menor para o Estado do Ceará, com apenas 36,1% do esgoto tratado e 74,2% dos habitantes sem nem mesmo a coleta de esgoto.

Em Fortaleza, capital cearense, apesar dos índices serem superiores em comparação aos dados nacionais, com abrangência do tratamento de esgoto atingindo 52,4% (TRATA BRASIL, 2017), diversos são os problemas relacionados ao esgotamento sanitário, acarretando consequências graves em termos de saúde pública e gestão dos recursos hídricos.

Nesse contexto, as zonas lacustres de Fortaleza, que serviram para abastecer a população da cidade até meados dos anos 60, atualmente servem de pontos de despejos para os esgotos gerados. Tal fato é agravado pela negligência no planejamento de uso e ocupação do solo, com a intensa atividade técnica de movimentação de terra resultando em processos de aterramento parcial ou total dessas áreas (LIMA, 2017).

Essa forma clandestina de destinar o esgoto está atrelada aos problemas de poluição dos mananciais das principais lagoas da capital cearense, como a lagoa da Parangaba, Maraponga, Mondubim e Messejana (LIMA, 2017). Os efluentes domésticos gerados nas proximidades destes corpos hídricos citados tem grande influência na alteração das características físico-químicas e microbiológicas, tornando-se importantes precursores de degradação ambiental, tais como: a depleção de oxigênio dissolvido e floração excessiva de microalgas (eutrofização) (RIBEIRO, 2009).

A eutrofização artificial, fenômeno derivado do enriquecimento da água em nutrientes (principalmente fósforo e nitrogênio) pela ação antrópica (lançamento de despejos ou lixiviados de áreas agricultáveis), destaca-se como um desses geradores de impactos negativos nos ecossistemas aquáticos. Tais nutrientes, também chamados de macronutrientes, quando presentes em águas (lagos, lagoas, represas e rios) são transformados em compostos orgânicos, matéria viva vegetal, pelo metabolismo das plantas (MOTA, 2008b). Além disso, há proliferação exagerada de plantas macrófitas aquáticas e fitôplankton, gerando a problemática da degradação desses mananciais com alterações de composição, pH, cor e turbidez (FONSECA, 2010).

Apesar desse tipo de contaminação ser um fenômeno recorrente nos mananciais cearenses, foi constatada pouca literatura referente ao tratamento desse problema. Sendo que, boa parte desta literatura encontrada se fundamenta em experimentos realizados em reservatórios para o abastecimento populacional, não fazendo referência a corpos hídricos de água com baixa velocidade de corrente, como é o caso de lagoas. Dessa forma, esta pesquisa busca alcançar maior compreensão e sistematização das informações sobre o problema da eutrofização em uma lagoa, especificamente na cidade de Fortaleza e de seus impactos a esse tipo de manancial, bem como auxiliar as autoridades que compõe o poder público na tomada de decisão mais adequada no que se refere às ações para conter essa problemática.

Segundo Abdala Neto (2012), no Estado do Ceará, a alternativa mais utilizada para o pré-tratamento da água que abastece os habitantes é a filtração direta descendente, processo que se estende para as redes de abastecimento das regiões do interior na sua forma ascendente e que, em sua maioria, utiliza açudes eutrofizados na fase de captação, fazendo que a água servida não atenda a qualidade desejada, por se tratar de um processo que tem como um dos principais parâmetros a qualidade da água bruta e aplicação de produtos químicos, do qual se destaca o cloro.

A aplicação de produtos químicos na fase inicial do tratamento de água, não se demonstra uma alternativa eficiente, pois deve haver cuidado no manuseio e estocagem desses materiais, além de suas aplicações estarem relacionadas à formação de subprodutos com teor carcinogênico, das classes de compostos representadas pelos trihalometanos (THM), ácidos haloacéticos (AHA), haloacetoneitrilas (HAN), (DI BERNARDO, 2005). Esses se tornam agentes que prejudicam à saúde e, muitas vezes, são negligenciados na fase de monitoramento. Nesse contexto, o presente trabalho se torna uma alternativa para o pré-tratamento de água sem a adição de compostos químicos para um corpo hídrico lacustre.

Desse modo, os Processos Oxidativos Avançados (POA) surgem como uma alternativa viável quando aplicados ao tratamento de águas eutrofizadas, pois oferecem diversos diferenciais, como o baixo consumo de energia, a redução da quantidade de rejeitos gerados e de matéria-prima. Dentre eles, destaca-se o processo eletroquímico, pois neste tipo de processo os elétrons agem diretamente no material tratado, eliminando a necessidade da adição de substâncias redutoras ou oxidantes potencialmente tóxicas. Além disso, sua utilização tem larga importância, pois reduz a toxicidade dos efluentes através da transformação de substâncias persistentes em substâncias facilmente biodegradáveis (BIDOIA, 2004; JIA *et al.*, 2007; TICIANELLI e GONZALEZ, 2005).

## **1.1 Objetivos**

### *1.1.1 Objetivo Geral*

Investigar a aplicação de uma célula eletrolítica (eletroflotação, eletrocoagulação e eletrooxidação) na clarificação de água contaminada de uma lagoa no município de Fortaleza, estado do Ceará.

### *1.1.2 Objetivos Específicos*

- ✓ Implementar o processo eletrolítico desde a concepção, montagem, instalação e operação em regime de batelada, aplicado ao pré-oxidação de águas contaminada;
- ✓ Analisar o uso de eletrodos de aço inox, alumínio e mista na célula eletrolítica com coletas de amostras para a caracterização físico-química de água bruta e tratada;
- ✓ Verificar a eficiência da aplicação do processo eletrolítico na clarificação de água contaminada de uma lagoa, avaliando a adequação de parâmetros físico-químicos (análises físico-químicas);
- ✓ Avaliar os custos envolvidos na aplicação do processo eletrolítico na clarificação de água contaminada de uma lagoa no município de Fortaleza-CE.

## **1.2 Estrutura do Trabalho**

A pesquisa foi dividida em cinco seções da seguinte forma: A primeira seção faz uma contextualização do problema atribuído a pesquisa no município de Fortaleza, bem como apresenta os objetivos que se espera alcançar nos resultados finais; a seção 2 mostra uma revisão de literatura dos principais conceitos a serem discutidos no decorrer do trabalho acadêmico; a seção 3 apresenta a metodologia da coleta de dados sobre o tema a ser estudado com base nos objetivos elaborados inicialmente, na seção 4 serão abordados os resultados obtidos por ensaios em laboratório abordando o objeto de estudo proposto e por fim serão apresentadas as conclusões que podem ser aferidas através dos resultados encontrados demonstrando a importância dessa pesquisa para o meio acadêmico.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Alguns componentes presentes na água alteram o seu grau de pureza e podem ser retratados de maneira ampla e simplificada em termos das suas características físico-químicas. A presença de sólidos dissolvidos, sólidos suspensos, gases e microrganismos definem as características físico-químicas e microbiológicas da água. Estas características podem ser traduzidas na forma de parâmetros de qualidade da água (VON SPERLING, 1996).

### 2.1 Principais parâmetros de qualidade da água

Para caracterizar uma água, são determinados diversos parâmetros, os quais representam as suas características físicas, químicas e biológicas. Esses parâmetros caracterizam a qualidade da água, pois quando alcançam valores superiores aos estabelecidos para os devidos usos, constituem impureza a água.

Nesse contexto, eles devem atender um padrão de potabilidade, ou seja, apresentar um conjunto de valores permitidos por meio de normatizações que visam a garantia de qualidade para o consumo humano. Dessa forma, alguns processos devem ser aplicados para que haja garantia de potabilidade e serventia à população.

Normalmente a qualidade de um corpo hídrico que será utilizado para abastecimento de uma população local é controlada através de amostras coletadas em locais pré-determinados e analisadas em laboratórios, para se determinar a sua composição.

Atualmente diversas tecnologias laboratoriais são capazes de caracterizar essa água a ser servida de forma eficiente, detectando uma enorme variedade de substâncias e microrganismos, mesmo em concentrações extremamente baixas. A clarificação por meio do processo oxidativo apresentado neste trabalho, tratará apenas de alguns parâmetros físicos e químicos.

#### 2.1.1 Sólidos

Os sólidos presentes na água podem estar distribuídos da seguinte forma: em suspensão (sedimentáveis e não sedimentáveis) relacionado ao parâmetro turbidez e dissolvidos (voláteis e fixos) relacionados ao parâmetro cor. Sólidos em suspensão são as partículas passíveis de retenção por processos de filtração. Sólidos dissolvidos são constituídos por partículas de diâmetro inferior a  $\mu\text{m}$  e que permanecem em solução mesmo após a filtração. A

entrada de sólidos na água pode ocorrer de forma natural devido a processos erosivos, organismos e detritos orgânicos ou antropogênica em consequência do lançamento de lixo e esgotos (BRASIL, 2014).

### 2.1.2 *Turbidez*

A turbidez é um parâmetro manifestado pela presença de materiais sólidos em suspensão que reduzem a sua transparência. A remoção de turbidez é importante para assegurar boa eficiência na fase de desinfecção da água, já que os micro-organismos utilizam as partículas suspensas como escudo contra os agentes desinfetantes (VON SPERLIGN, 1995), dessa forma, se destaca como um indicador sanitário de padrão de aceitação da água para o consumo humano. Sendo utilizado muitas vezes como um indicador da presença de um estado eutrófico.

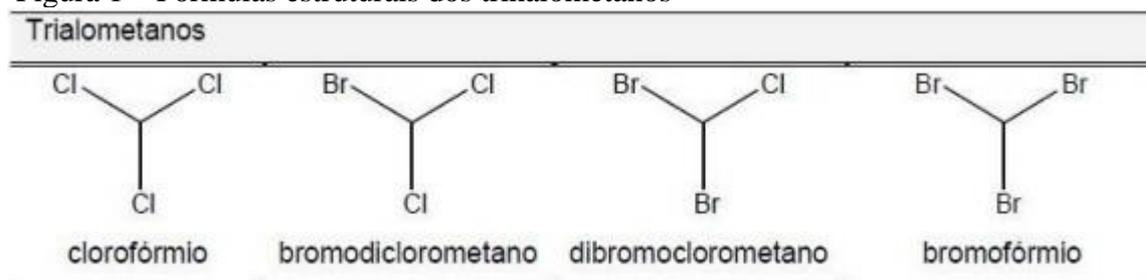
Além disso, turbidez é muito utilizada como forma indireta de estimar a biomassa fitoplanctônica em águas de abastecimento humano.

### 2.1.3 *Cor*

A cor da água está relacionada à presença de sólidos dissolvidos podendo ser resultado de metais como ferro e manganês dissolvidos. Tem-se na determinação da cor duas possibilidades de aferição, uma classificada de cor aparente se referindo à determinação de cor em amostras com turbidez após centrifugação, e outra de cor verdadeira se referindo à determinação de cor em amostras sem turbidez. Bem como da presença de Matéria Orgânica Natural (MON) representada por matéria dissolvida mais a parcela em suspensão, e cor verdadeira, devido somente à presença de matéria dissolvida. A cloração de águas coloridas denota a importância ambiental da cor como parâmetro de qualidade, pois fomenta a formação de produtos potencialmente cancerígenos (trihalometanos - THM) (LIBÂNIO, 2010).

Os THMs pertencem a um grupo de compostos orgânicos que são derivados do metano (CH<sub>4</sub>) em cuja molécula três de seus quatro átomos de hidrogênio foram substituídos por igual número de átomos dos elementos halógenos (cloro, bromo ou iodo), conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Fórmulas estruturais dos trihalometanos



Fonte: Paschoalato (2005).

#### 2.1.4 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica indica a capacidade da água natural de transmitir corrente elétrica em função da presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ânions e cátions. Vincula-se ao teor de salinidade, sendo relevante em regiões suscetíveis a elevadas taxas de evaporação e baixa intensidade pluviométrica. Também pode ser um indicador de eventual lançamento de efluentes por relacionar-se à concentração de cloretos e sólidos dissolvidos totais - TDS (LIBÂNIO, 2010).

#### 2.1.5 Potencial hidrogeniônico (pH)

Consiste na concentração dos íons nas águas e representa a intensidade das condições ácidas ou alcalinas da água. A estabilização do pH determina a eficiência na remoção de impurezas e esse talvez seja o parâmetro de maior frequência de monitoramento na rotina operacional das estações de tratamento de água, pela sua interferência em diversos processos e operações unitárias inerentes à potabilização, tais como a aplicação dos coagulantes (influenciando na solubilidade do sulfato de alumínio) ao processo de desinfecção química (LIBÂNIO, 2010).

#### 2.1.6 Cloretos

Os cloretos, geralmente, provêm da dissolução de minerais ou da intrusão de água do mar, e ainda podem advir dos esgotos domésticos ou industriais. Em altas concentrações, conferem sabor salgado à água ou propriedades laxativas (BRASIL, 2014).

## 2.2 Eutrofização

Concentrações elevadas de substâncias orgânicas dissolvidas associadas aos particulados geradas pela produção biológica acarretam, principalmente, prejuízos nos processos de tratamento da água (coagulação, floculação e filtração). Os mecanismos da eutrofização provocam diminuição na diversidade das espécies e promovem um crescimento exagerado de Algas verdes e cianobactérias que são difíceis de serem removidas e podem servir de substrato para o crescimento bacteriológico nas redes de distribuição (SALES, 2005).

Não menos importantes, além dos riscos inerentes à saúde, os problemas operacionais causados nas estações de tratamento de água pela presença de fitoplâncton independem da tecnologia empregada. Nas estações onde existem as etapas de coagulação, floculação e decantação, antes da filtração, nota-se que, mesmo com a pré-desinfecção, as algas flutam nos decantadores e são carregadas para os filtros, obstruindo o meio filtrante em poucas horas de funcionamento, resultando em um gasto de 20 a 40% do volume de água produzido na lavagem dos filtros, provocando paralisação temporária, além de possibilitar a formação de compostos orgânicos clorados (DI BERNARDO, 1995).

O significado literal da palavra eutrofização é de origem grega, e é definido como o mecanismo de tornar bem alimentado um corpo hídrico, acumulando elevados níveis de nutrientes básicos. Segundo Netto (1998), a extensão desse fenômeno à lagos, reservatórios e lagoas naturais é mais agravante, pois esses recursos detêm menor velocidade de curso d'água, gerando o comprometimento da sua utilização para finalidades públicas e privadas, e sendo a qualidade condicionada a análise de alguns fatores:

- a) Oxigênio Dissolvido (requer sempre uma apreciação crítica); b) Plâncton (examinado ao longo do tempo, permite acompanhar a evolução do fenômeno); c) Transparência (medida pelo disco de Secchi); d) Turbidez (influi na penetração da luz e na sua disponibilidade para a fotossíntese); e) Clorofila a (aplicável com restrição aos lagos rasos sempre que não se levar em conta a influência das plantas macrofitas); f) Nitrogênio Particulado (NETTO, 1998, p. 22).

O estado trófico é uma propriedade fundamental dos ecossistemas aquáticos, visto que demonstra como a ação antrópica exerce a sua influência na qualidade da água e do funcionamento ecológico dos mananciais (NETTO, 1998). Os principais estados de trofia em corpos d'água encontram-se sintetizados no Quadro 1.

Quadro 1 – Representação dos estados tróficos dos mananciais

Estado de eutrofização	Caracterização
Oligotrófico	Águas limpas, de baixa produtividade, em que não ocorrem interferências indesejáveis sobre os usos da água, decorrentes da presença de nutrientes. Observação Neste estado trófico do manancial é o ideal para a utilização da água para o consumo humano.
Mesotrófico	Águas com produtividade intermediária, com possíveis implicações sobre a qualidade da água, mas em níveis aceitáveis, na maioria dos casos. Neste estado trófico desse manancial, é aceitável a utilização da água para o consumo humano sob determinadas condições.
Eutrófico	Corpos de água com alta produtividade, com redução da transparência, em geral afetados por atividades antrópicas, nos quais ocorrem alterações indesejáveis na qualidade da água e interferências nos usos múltiplos. Neste estado trófico, é aceitável a utilização da água para o consumo animal.
Hipereutrófico	Águas afetadas significativamente pelas elevadas concentrações de matéria orgânica e nutriente, com comprometimento acentuado nos seus usos, associado a episódios de florações de algas ou mortandade de peixes, com comprometimento acentuado nos seus usos.

Fonte: Adaptado de Barbosa (2017).

A classificação quanto ao estado trófico de um manancial demonstra a gravidade do problema e a necessidade ou não de medidas de intervenção. Ainda de acordo com Netto (1988), a qualidade do manancial sobre o ponto de vista eutrófico pode fornecer uma indicação sobre o estágio desse processo.

Desse modo, pode-se determinar a situação de poluição que se encontra o ecossistema aquático, pois muitas vezes há mudança da condição de oligotrófico e mesotrófico para eutrófico ou mesmo hipereutrófico, acarretando profundas alterações nas condições físicas e químicas do meio e no nível de produção do ecossistema em detrimento da qualidade de vida das comunidades aquáticas.

Nessa perspectiva, o Índice de Estado Trófico (IET) funciona como um registro das atividades antrópicas nas bacias hidrográficas, além de oferecer mecanismos para a formulação de planos de gestão de ecossistemas aquáticos, por meio de estratégias que visem à sustentabilidade dos recursos hídricos e que garantam os diversos usos da água, em médio e longo prazo (VON SPERLING, 1996).

Os índices mais adequados para se avaliar o estado de trofia dos mananciais são decorrentes do estudo do modelo de Carlson (IETC), são eles: Toledo Jr. *et al.* (IETT) e Lamparelli (IETL), pois estes foram desenvolvidos no Brasil, tanto para ambientes com comportamento lênticos, quanto para ambientes com comportamentos lóticos.

De acordo com Oliveira (2009), os resultados dos ensaios laboratoriais com coleta de água de profundidade entre 30-50cm durante 8 meses da lagoa da Parangaba, apresentaram IETT - 76,01, enquadrando-a no nível eutrófico e IETL - 75,07, incluindo-a no estado hipereutrófico, suportando a conclusão de que a lagoa estaria contaminada.

Além disso, as análises bimestrais realizadas de janeiro a agosto nos dias mais chuvosos demonstraram que os efluentes despejados continuamente superam a capacidade de suporte desse manancial, impedindo o processo de autodepuração, dessa forma, a Lagoa apresentou hipereutrofia em toda sua extensão (OLIVEIRA, 2009).

Ademais, a turbidez serve como um parâmetro de constatação da situação de estado poluição de um manancial lacustre, pois evidencia se um feixe de luz sofre atenuação ao atravessar esse corpo hídrico, podendo ser obtida a partir da avaliação em escala laboratorial da água estudada.

De acordo com Sampaio (2008), a coleta de amostras da lagoa da Parangaba no período de agosto a dezembro de 2006 demonstrou que essa água apresentou uma elevada taxa de turbidez evidenciada pelo excesso de macrófitas, fitoplâncton e elevada oxigenação.

### **2.3 Controle de qualidade das águas de abastecimento**

A água para ser considerada adequada ao consumo, não pode conter substâncias químicas nocivas à saúde e deve estar livre de contaminação microbiológica. Além disso, deve gerar atração pelo aspecto e não deve apresentar sabor para ser bebida, estando adequada para finalidades domésticas e para a maior parte das atividades industriais.

O tratamento de águas para abastecimento humano pode ser definido como o conjunto de operações unitárias realizadas com a finalidade de adequar as características físico-químicas e microbiológicas da água, com padrão de potabilidade estabelecido pela legislação em vigor (DI BERNARDO, 2003). O referido padrão é determinado por órgãos competentes por intermédio de legislação específica.

A potabilidade da água é definida através de um conjunto de parâmetros (físico-químicos, microbiológicos e radiológicos) estabelecidos por normas e legislações sanitárias. É

fundamental vigiar e controlar a qualidade das águas de abastecimento público visando garantir a segurança hídrica das populações abastecidas.

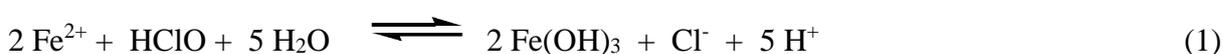
No Brasil, o Ministério da Saúde elabora periodicamente no Diário Oficial da União, uma compilação de parâmetros que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Atualmente (até o fechamento deste trabalho) encontra-se em vigor o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5 de 2017, referente ao Controle e da Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano e seu Padrão de Potabilidade.

Para se adequar as águas utilizadas como fonte de abastecimento, destinadas ao consumo humano, a legislação, geralmente são utilizadas instalações denominadas de Estação de Tratamento de Águas. Estas estações congregam etapas que podem variar dependendo da qualidade da água bruta a ser tratada, os conjuntos de etapas selecionadas, geralmente, podem redundar nas denominações: Tecnologia de Tratamento de Água Convencional (ou Completa); Tecnologia de Tratamento de Água por Filtração Direta; Tecnologia de Tratamento por Filtração Lenta, dentre outras.

## 2.4 Etapas do tratamento de água para consumo humano

### 2.4.1 Pré-oxidação

No tratamento da água, o uso dos oxidantes tem como finalidade remover ferro e manganês, melhorar as condições organolépticas da água, destruindo gostos e odores, removendo cor, oxidando produtos sintéticos orgânicos, controlando contaminação microbiológica no interior das estações de tratamento. A pré-oxidação este pode ser utilizado como auxílio à coagulação e à floculação. Segundo Di Bernardo (2005), o processo de oxidação envolve a troca de elétrons entre espécies químicas com mudança do estado de oxidação (valência) das espécies envolvidas. Como uma espécie perde elétrons ou é oxidada e outra ganha elétrons ou é reduzida, o processo é comumente denominado de oxi-redução. Para ilustrar esse conceito, considere-se a reação de  $\text{Fe}^{2+}$  com  $\text{HOCl}$  (ácido hipocloroso) em meio aquoso, conforme apresentado na Equação (1):



O cloro livre ao ser aplicado na água bruta captada em mananciais superficiais, que geralmente possuem grandes quantidades de matéria orgânica natural (MON), leva à formação de diversos subprodutos, sendo os mais comuns os THM e os AHA. Sales (2005) verificou que em diversas estações de tratamento de águas (ETA's) do Brasil que apresentam a fase de pré-oxidação da água bruta, não é feito o monitoramento adequado dos subprodutos gerados potencialmente prejudiciais à saúde.

Nesse contexto, foram realizados diversos estudos para se obter alternativas viáveis para o pré-tratamento de água visando a redução dos danos à saúde humana e o desenvolvimento de técnicas para o tratamento de águas de abastecimento e residuárias.

#### 2.4.2 *Coagulação*

A etapa de coagulação visa melhorar o aspecto visual da água para consumo humano, favorecendo a qualidade microbiológica do efluente. De acordo com a CAGECE – Companhia de Água e Esgoto do Ceará (2016) são adicionados Policloreto de Alumínio (PAC) como coagulante que vai provocar a desestabilização das partículas coloidais e suspensas.

O processo de coagulação da água bruta é um componente essencial para assegurar níveis adequados de qualidade como Turbidez inferior a 5 UNT (Unidades Nefelométricas de Turbidez) e ausência de microrganismos patogênicos.

#### 2.4.3 *Floculação*

Na ETA – Estação de Tratamento de Água, a floculação representa a etapa onde se torna mais favoráveis para a agregação de partículas previamente desestabilizadas por coagulação química, facilitando a formação de flocos com pesos e tamanhos dos quais favorecem sua remoção seja ela por sedimentação, flotação ou filtração direta. Sua eficiência depende diretamente do desempenho da unidade de mistura rápida, a qual pode ser levada em consideração fatores tais como coagulante, pH de coagulação, qualidade da água bruta, temperatura da água, entre outros. O desempenho dos processos influencia diretamente na qualidade da água produzida em uma Estação de Tratamento de Água.

#### 2.4.4 Decantação

Para Richter e Azevedo Netto (1991) a etapa de decantação se configura com a separação das partículas de densidade superiores a da água e, posteriormente, a sedimentação promovida pelas forças gravitacionais.

#### 2.4.5 Filtração

A filtração é um processo físico em que a água atravessa um leito filtrante de modo que as partículas em suspensão responsáveis pela cor e turbidez sejam retidas produzindo um efluente mais limpo. Na ETA é desenvolvida a filtração direta descendente na qual a água percorre a camada filtrante de cima para baixo, em 16 filtros. Esse tipo de filtração apresenta vantagens em relação ao tratamento convencional porque tem menor consumo de produtos químicos durante o processo de tratamento de água, facilitando o processo de operação e manutenção, gerando uma economia de recursos (CIDRACK, 2015). De modo a ilustrar este processo, a seguir na Figura 2 estão representadas as unidades da filtração de uma ETA, localizada na ETA Gavião principal fonte de abastecimento da cidade de Fortaleza e região metropolitana, obtida a partir de pesquisa bibliográfica.

Figura 2 – Filtros descendentes



Fonte: Vergínia (2017).

### 2.4.6 Desinfecção

A desinfecção, última etapa do tratamento, corresponde aos processos de destruição ou inativação de organismos patogênicos que são capazes de provocar doenças indesejáveis, melhorando a qualidade bacteriológica e a segurança sanitária. Após tratada, a água é levada pelas estações elevatórias para os reservatórios e depois é distribuída para a população, através de redes de tubulações subterrâneas da Companhia.

A aplicação de cloro no tratamento da água de abastecimento da população é embasada no fato de que esse elemento químico é o agente desinfetante e oxidante mais utilizado no mundo, porque apresenta elevada eficácia na inutilização da ampla variedades de patógenos comumente encontrados na água, além de possibilitar uma manutenção de concentração residual (barreira sanitária), por não necessitar de um aparelhamento especializada e pelo baixo custo para cada litro que é tratado na ETA (DI BERNARDO, 2005).

Figura 3 – Etapa de Desinfecção final na ETA Gavião



Fonte: Gondim (2018).

## 2.5 Tecnologias de tratamento de água para consumo humano

Em Fortaleza as principais tecnologias de tratamento de águas destinadas ao consumo incluem o tratamento por filtração direta em linha, onde a coagulação e a pré-oxidação são feitas em linha (um canal de água bruta até a etapa de filtração e desinfecção). A simples desinfecção não é mais considerada tecnologia de tratamento para águas superficiais, sendo

aplicada apenas em águas subterrâneas que atendam aos padrões de potabilidade e, por isso são sanitariamente seguras (SAMPAIO, 2014; DI BERNARDO, 2002).

Atualmente, o maior sistema produtor de água da CAGECE, a ETA Gavião também se destaca por contemplar boa parte dessas etapas no que diz respeito a este tipo de tratamento convencional (Filtração Direta).

A vista área ilustrada pela Figura 4 apresenta as etapas destes processos, anteriormente citados, para a estação de tratamento de água que abastece a maior parte do município de Fortaleza (ETA Gavião).

Figura 4 – Vista aérea da principal ETA de Fortaleza (ETA Gavião)



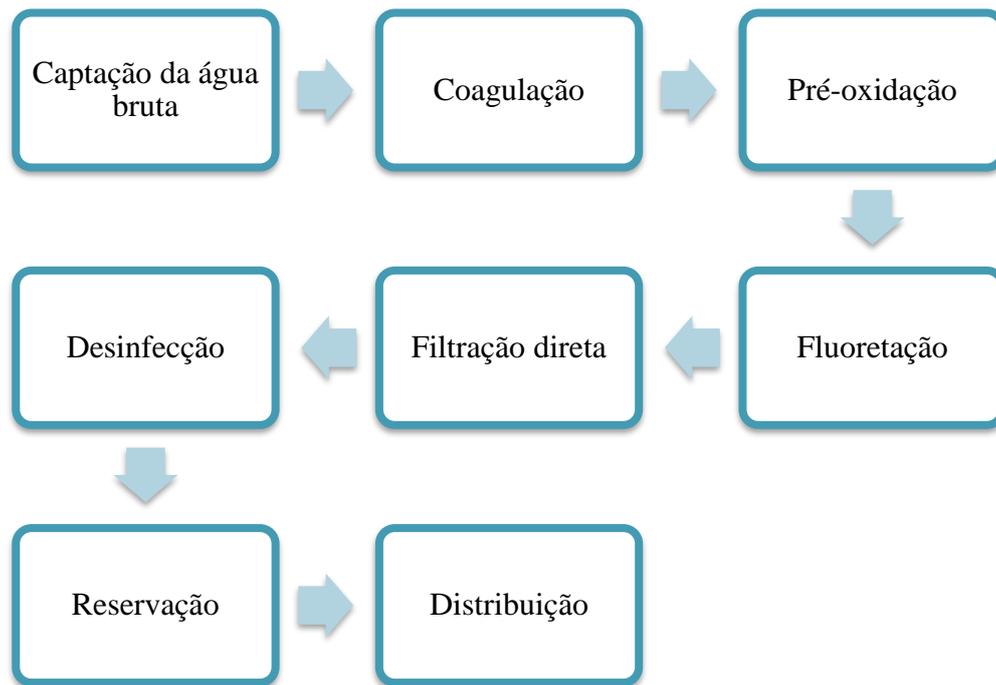
Fonte: Adaptado de Gondim (2018).

Das tecnologias usuais de tratamento existentes, a filtração direta em linha é a que apresenta menor custo de implantação, porém é necessário se levar em consideração que esse processo é eficiente apenas para o tratamento de águas brutas com até um limite da quantidade de matéria em suspensão e substâncias dissolvidas. Se as características físico-químicas e bacteriológicas da água bruta coletada excederem as concentrações recomendadas para o uso da Filtração Direta em Linha, deve-se optar pelo tratamento completo (SAMPAIO, 2014).

Antes de ser servida a população, a água passa por processos de tratamento com diversas etapas. Esses processos podem ser físicos e químicos, fazendo que a água obtenha todas as propriedades necessárias para que se torne própria para o consumo.

Atualmente, a principal estação de tratamento de abastecimento de água da cidade de Fortaleza, a ETA Gavião, apresenta uma capacidade nominal de produção de 10 m<sup>3</sup>/s e seu processo de tratamento ocorre conforme demonstrado na Figura 5, que vão desde as etapas de captação, coagulação, pré-oxidação, fluoretação, filtração direta descendente, até a desinfecção ou cloração, seguida da reservação e distribuição (CAGECE, 2016).

Figura 5 – Fluxograma do processo de tratamento da ETA Gavião



Fonte: Adaptado de Cagece (2016).

### 2.5.1 Filtração direta descendente

A filtração direta descendente é um processo em que a água previamente coagulada e floculada é encaminhada diretamente para os filtros rápidos. Os filtros devem remover as impurezas que causam cor e turbidez, assim como os produtos gerados pelos reagentes químicos utilizados no processo (RICHTER, 2009). A Figura 6 ilustra a etapa de filtração descendente aplicada a ETA Gavião, localizada no município de Fortaleza – CE.

Figura 6 - Filtração descendente aplicada a ETA Gavião



Fonte: Gondim (2018).

Richter e Azevedo Netto (1991) avaliam a importância de se prever e considerar o que poderá ocorrer com o manancial no futuro (possível degradação progressiva) e enumeram as vantagens e desvantagens da filtração direta no Quadro 2.

Quadro 2 – Vantagens e desvantagens da aplicação de filtração direta

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Estações mais compactas	Aplicabilidade limitada e muito dependente das características da água bruta e da manutenção da sua qualidade ao longo do tempo
Custo de construção 15 a 35 % menor do que o custo das estações convencionais	Mais sensível às variações de qualidade da água exigindo operação mais cuidadosa e operadores mais hábeis
Despesas menores com reagentes	Lavagem mais frequente dos filtros e maior gasto de água para lavagem
Menor produção de iodo	Menor flexibilidade do processo

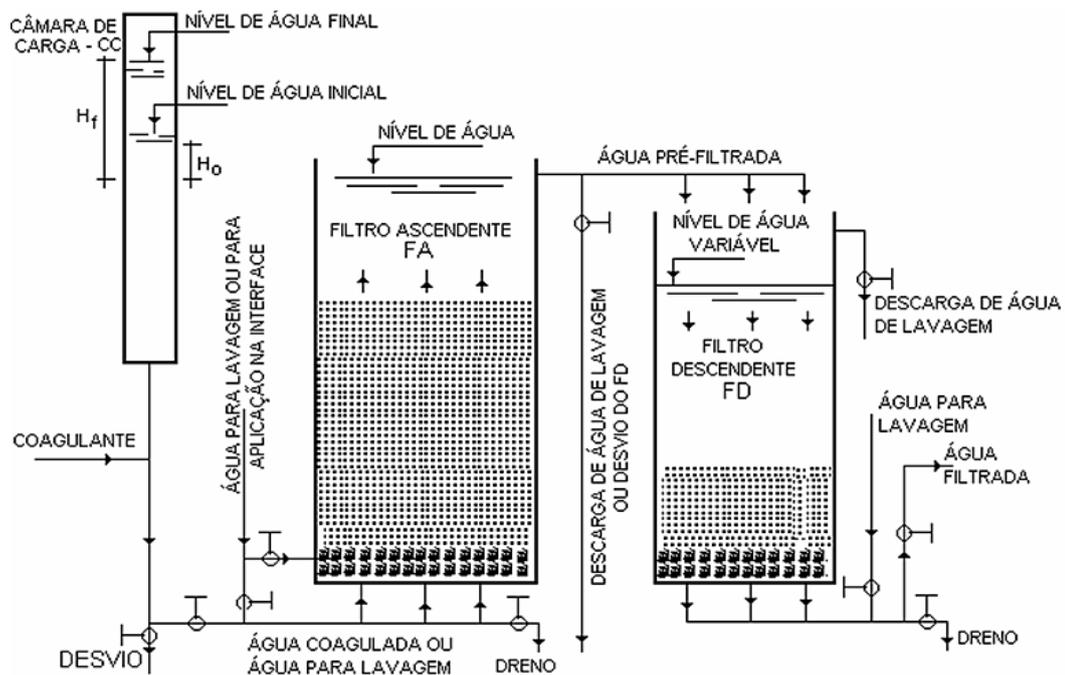
Fonte: Adaptado de Sampaio (2016).

### 2.5.2 Dupla filtração

Giulliano (2009) avaliou o desempenho da dupla filtração em uma instalação piloto seguido de uma unidade de carvão ativado granular para o tratamento de uma usina hidrelétrica, visando a remoção da matéria orgânica dissolvida e turbidez. A tecnologia aplicada se mostrou eficiente para produção de água que atenda aos requisitos do padrão de potabilidade brasileiro, além de diminuir a formação de subprodutos carcinogênicos, reduzindo cor e turbidez.

Na Figura 7 é mostrado um esquema de uma instalação de Dupla Filtração (DF), constituída de um filtro ascendente e de um descendente, operados com taxa constante. A água bruta chega em uma Câmara de Carga (CC), na qual o nível de água irá variar em função da perda de carga devido a retenção de impurezas no meio granular do Filtro Ascendente (FA).

Figura 7 – Esquema de uma Instalação de Dupla Filtração



Fonte: Di Bernardo (2003).

## 2.6 Tecnologia não convencional aplicado ao tratamento de águas

Nas últimas décadas a aplicação dos Processos Oxidativos Avançados (POAs) tem ganhado destaque no desenvolvimento de tecnologias para o tratamento de águas residuais principalmente pela sua eficiência em reduzir os impactos ambientais.

Esse método surgiu a partir da demanda por tecnologias que atendam ao tratamento de efluentes com um custo relativamente mais baixo, e demonstrou-se um sistema eficaz nesse

sentido. Esse mecanismo de tratamento funciona por meio de geradores de radical hidroxila ( $\text{OH}^\cdot$ ) que apresentam potencial de oxidação de 2,8 V em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio, conferindo-lhe características de espécies altamente oxidantes em quantidade suficiente para provocar a mineralização da matéria orgânica à dióxido de carbono, água e íons inorgânicos menos tóxicos e com maior facilidade de degradação (ABDALA NETO, 2012).

O radical hidroxila pode ser gerado de diversas formas, seja em fase homogênea ou heterogênea, necessitando ou não a presença de sistemas de irradiação. As principais utilizam ozônio, peróxido de hidrogênio, cavitação hidrodinâmica, fotocatalise e o reagente de Fenton. São classificados em sistemas homogêneos ou heterogêneos, conforme a ausência ou a presença de catalisadores na forma sólida, além de poderem estar ou não submetidas à irradiação. No Quadro 3 estão apresentados os sistemas típicos de processos oxidativos avançados.

Quadro 3 – Tipos de Processos Oxidativos Avançados

<b>Sistemas Homogêneos</b>		<b>Sistemas Heterogêneos</b>	
<b>Com irradiação</b>	<b>Sem irradiação</b>	<b>Com irradiação</b>	<b>Sem irradiação</b>
$\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$	$\text{O}_3/\text{OH}^\cdot$	Catalisador/UV	Eletro-Fenton
$\text{O}_3/\text{UV}$	$\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$	Catalisador/UV/ $\text{H}_2\text{O}_2$	Eletroquímico
$\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$	$\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$	Catalisador/ Fotoeletroquímico	Cavitação

Fonte: Abdala Neto (2012).

Os processos de clarificação da água que apresentam radical hidroxila ( $\bullet\text{OH}$ ) no mecanismo de reação demonstram que esse composto possui o maior potencial padrão de redução ( $E^\circ$ ) superando as demais espécies oxidantes, como pode ser visualizado na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Valores do potencial padrão de redução ( $E^\circ$ ) de espécies oxidantes

Espécie	$E^\circ$ (V)
Radical Hidroxila, $\text{OH}^\cdot$	+2,80
Ozônio, $\text{O}_3$	+2,07
Peróxido de Hidrogênio, $\text{H}_2\text{O}_2$	+ 1,77
Hipoclorito, $\text{ClO}^-$	+1,43
Radical Peridroxil, $\text{HO}_2$	+1,42
Cloro, $\text{Cl}_2$	+1,36
Oxigênio, $\text{O}_2$	+1,23

Fonte: Shin *et. al.*, (2008).

Dessa forma é possível compreender o destaque que esse radical apresenta em relação aos demais radicais usuais para o tratamento de águas residuais, pois esse elevado padrão de redução permite maior velocidade de reação com a grande maioria dos contaminantes encontrados usualmente nessas águas, como os metais pesados, partículas orgânicas, materiais orgânicos solúveis (ureia, açúcares, proteínas), dentre outros.

De acordo com Pignatello *et al* (2006) *apud* Araujo *et al.* (2016), os POAs apresentam em comum seu mecanismo de reação altamente reativo pela participação direta do radical hidroxila ( $\text{OH}^\cdot$ ), sendo esse radical capaz de oxidar e decompor várias espécies tóxicas e/ou recalcitrantes, configurando-se como um importante ponto no tratamento de resíduos. Além disso, este radical é responsável por iniciar reações em cadeia, sendo utilizado em tratamentos de águas contaminadas, uma vez que atua como iniciador dos processos de purificação.

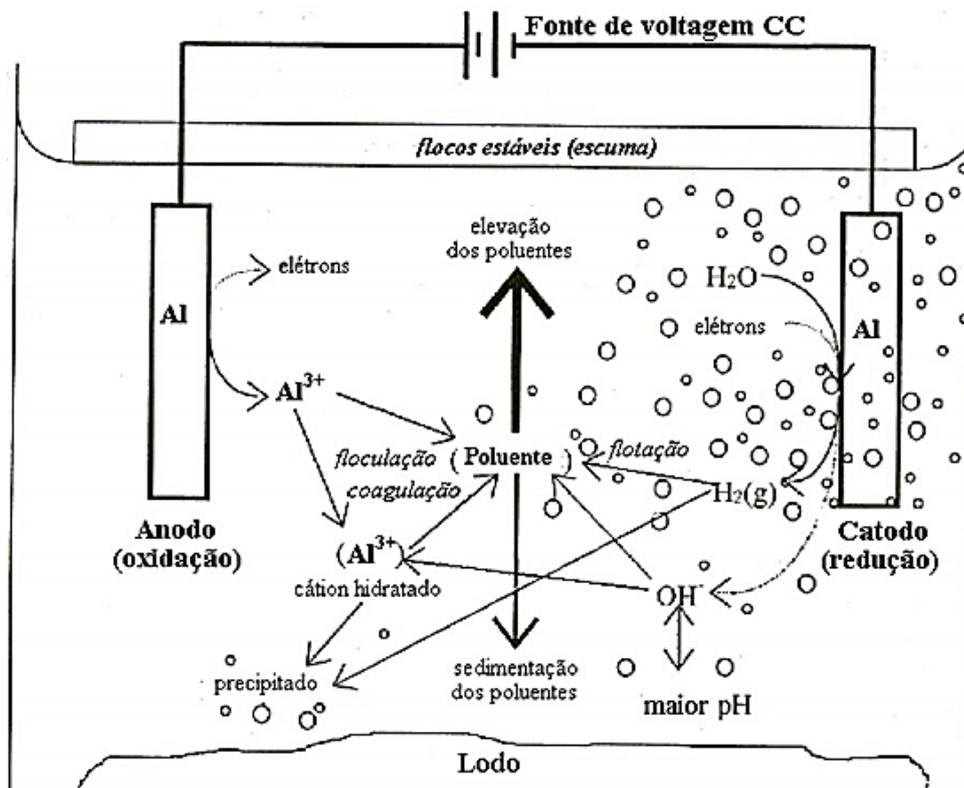
## 2.7 Processo eletrolítico

A eletrólise é um processo não espontâneo que baseia-se no conjunto de reações geradas pela passagem de corrente elétrica entre dois terminais que são responsáveis pela oxidação dos compostos, induzida por um fonte externa de energia elétrica, propiciando um fluxo de elétrons que podem ocasionar diferentes mecanismos de remoção dos contaminantes, e que agrega oxidação, flotação e coagulação (ATKINS; JONES, 2001).

Este tipo de processo tem sido cada vez mais ampliado em suas utilizações, principalmente, com uso em matrizes ambientais. Porém, tem sido relevante a discussão acadêmica para a reavaliação desta opção na aplicação da clarificação de recursos hídricos que recebem efluente doméstico. Estes processos eletrolíticos apresentam algumas vantagens, tais como: a facilidade de operação e possibilidade de automação. A grande vantagem em relação aos métodos tradicionais, seria de permitir a produção de compostos desinfetantes *in situ*, reduzindo os custos aos processos, além dos problemas de estocagem e transporte de produtos químicos danosos (OTENIO *et al.*, 2010).

Na Figura 8 estão representados os diferentes mecanismos de remoção decorrentes do fenômeno da eletrólise. Dentre as reações advém à formação de gases, como o oxigênio e o hidrogênio, estes auxiliam na flotação das partículas coaguladas e propiciam a ocorrência dos fenômenos de eletrocoagulação e eletroflotação das partículas, cuja principal consequência é sedimentar o material de maior gramatura, sendo depositados os poluentes no fundo da câmara ocasionando a formação do lodo. Na eletroflotação, por meio da união aos gases das partículas suspensas, os contaminantes de menor massa são removidos através de arraste para a superfície, gerando a formação da espuma (ATKINS, 1990).

Figura 8 – Esquematização do processo eletrolítico



Fonte: Adaptado de Pessoa (2008).

Além dos benefícios gerados pela remoção de poluentes na água, este processo está relacionado ao baixo consumo de energia quando o tratamento de água residual a ser tratada for de alta condutividade (BAYAR *et al.*, 2011).

A corrente pulsada é o fluxo uni ou bidirecional de partículas carregadas que cessam por um período de tempo finito. A corrente pulsada é caracterizada pelo aspecto de uma unidade elementar desse tipo de corrente chamado pulso. Se uma voltagem fixa for aplicada a um circuito elétrico de resistência simples, uma corrente unidirecional será induzida no condutor. Se o circuito for periodicamente interrompido abrindo e fechando um interruptor do circuito, o movimento de elétrons produzido irá começar e parar em sincronia com o fechamento e a abertura do interruptor (ROCHA, 2018, p. 56).

Claro *et al.* (2010), propuseram a avaliação em escala laboratorial do processo eletrolítico em um efluente de lagoa de estabilização de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), relacionando o tempo de exposição de corrente com os parâmetros avaliados, acrescido de uma solução salina. Dessa forma, foi possível observar a eficiência na prevenção da eutrofização do corpo hídrico pois reduziu-se efetivamente o fósforo, precursor deste fenômeno, evitando a proliferação de algas e plantas aquáticas.

### 2.7.1 Eletrocoagulação

O processo de eletrocoagulação é uma técnica que aborda a geração de coagulantes *in situ* a partir das placas (alumínio e/ou ferro) inseridas no processo eletrolítico, por meio da corrente alternada aplicada aos eletrodos que os alimentam. Além de gerar um menor custo operacional ao sistema por se tratar de unidades compactas e de menor porte, e possuírem versatilidade quanto a sua aplicação em tanques de tratamento que envolvem grandes volumes de efluentes.

O processo de transporte das partículas geradas pela coagulação pode ocorrer através da sedimentação do material no fundo da célula. Com o deslocamento dos gases e dos elétrons gerados não há necessidade de promover a agitação da água para provocar a colisão entre os flocos de menor dimensão, o processo possibilita a remoção das partículas coloidais menores (WIENDL, 1998).

A eletrocoagulação tem desempenhado um papel importante para o tratamento de águas residuais e outras questões relacionadas à gestão da água. De acordo com Malakootian, Mansoorian e Moosazadeh (2010) a etapa de eletrocoagulação se subdivide em três. Na primeira etapa, temos a formação de coagulante por meio da dissolução dos íons no ânodo. Na

segunda, há a desestabilização de poluentes e partículas seguida de uma agregação, e na terceira, há a formação de flocos suspensos por gases. Reação de oxidação (ânodo):



Em condições alcalinas:



Em condições ácidas:



• Reação da formação do oxigênio (ânodo):



Simultaneamente ocorre a reação no cátodo para a formação do hidrogênio que é dependente do pH do meio; em condições neutras ou alcalinas, conforme a reação a seguir:



Em condições ácidas a reação que ocorre no cátodo:

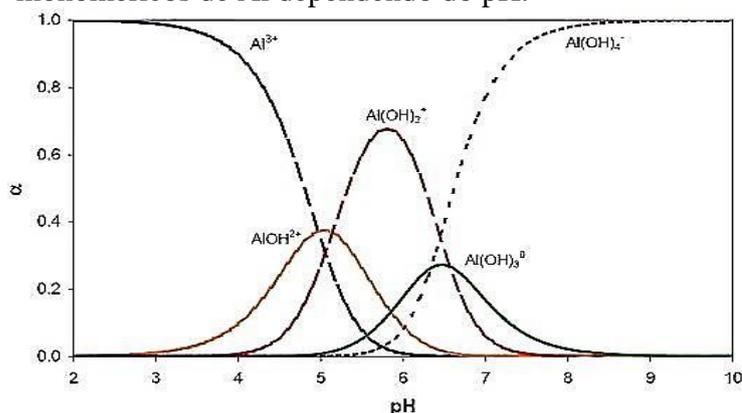


Na etapa de coagulação das partículas, o metal carregado positivamente pode reagir com partículas de cargas negativas em baixas concentrações desse material. Entretanto, a reação pode ficar limitada pela hidrólise da espécie carregada, liberada em grande quantidade pelo eletrodo, que, por sua vez, é muito rápida. Assim, a adsorção e a neutralização podem ocorrer, porém seus efeitos são bem menos expressivos quando comparados com a ação dos hidróxidos formados a partir da oxidação do eletrodo metálico. Nesta etapa é de grande interesse que a hidrólise resulte em hidróxido, uma vez que esse composto será o maior responsável por remover as impurezas do efluente.

O pH do meio, a concentração final de  $\text{Al}^{3+}$  e o transporte das espécies hidrolisadas são os fatores principais para a formação de flocos, esse transporte faz com que haja o contato

com as impurezas e em seguida a floculação. A dependência (pH – colóides) pode ser representada na Figura 9 a seguir, mostrando a relação da constante de dissociação ( $\alpha$ ) dos compostos dependendo do pH, ou seja, a preferência de formação de compostos dependendo do pH do meio (HOLT, P., 2002).

Figura 9 – Diagrama de distribuição dos compostos monoméricos de Al dependendo do pH.



Fonte: Holt (2002).

### 2.7.2 Eletroflotação

A etapa de eletroflotação ou eletrofloculação é um processo eletrolítico que envolve a desestabilização de poluentes em suspensão ou emulsificados, em meio aquoso (AQUINO NETO, 2011).

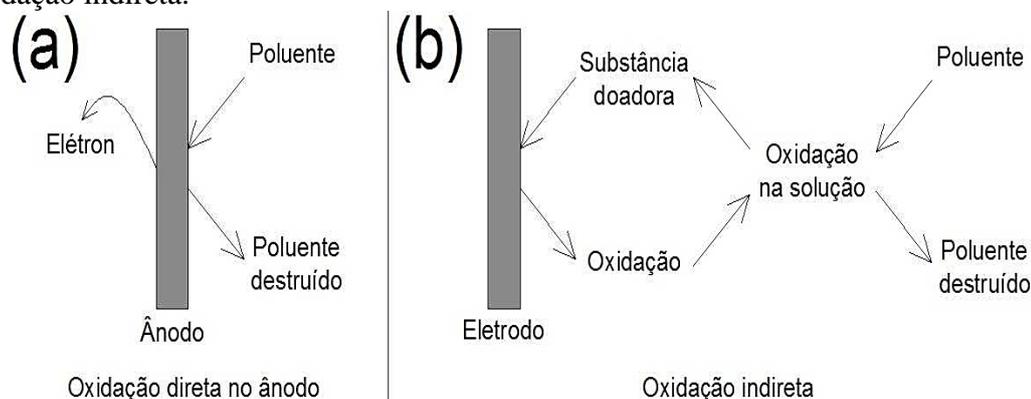
A eletroflotação é uma técnica eletroquímica de separação utilizada na remoção de poluentes de águas residuais de indústrias têxteis e urbanas, principalmente, e que já foi testada dando resultados satisfatórios. A técnica consiste na geração de agente coagulante devido à dissolução eletrolítica de ânodos de alumínio, produzindo espécies como  $Al^{3+}$  que ao serem hidrolisadas formam o agente coagulante  $Al(OH)_3$ .

### 2.7.3 Eletroxidação

Nesta etapa do processo eletrolítico os poluentes podem ser desconstruídos por oxidação direta no ânodo (Figura 10 (a)) ou por oxidação indireta (Figura 10 (b)). Na oxidação direta no ânodo, os poluentes são primeiramente adsorvidos na superfície do ânodo e, em seguida, destruídos pela reação de transferência de elétrons (radicais hidroxilas). Na oxidação

indireta, um forte oxidante, como hipoclorito, ou um íon metálico oxidado, pode ser gerado no processo, e os poluentes são destruídos na solução pelo agente oxidante.

Figura 10 – Vias da remoção de poluentes no processo eletroquímico; (a) oxidação direta; e (b) oxidação indireta.



Fonte: Adaptado de Chiang, Chang e Wen (1995).

Nesse contexto, a eficiência eletroquímica depende de muitos fatores, incluindo o tipo de material dos eletrodos, o regime de fluxo dinâmico, a densidade de corrente, o pH e a existência de compostos capazes de atuar como mediadores na solução (elementos que doem elétrons). Para Ghernaout, Naceur e Aouabed (2011) os principais fatores que influenciam no rendimento do processo eletrolítico são:

- **Potencial do eletrodo e densidade de corrente:** sua taxa determina a eficiência do processo, o que determina a ocorrência das reações.
- **Distribuição de corrente:** determina a distribuição espacial do consumo de reagentes e é recomendável ser mais homogênea o possível.
- **Transporte de massa:** uma maior eficiência é obtida quando há um elevado coeficiente de transporte de massa que leva a uma maior uniformidade da concentração de poluentes na camada de reação perto da concentração da superfície do eletrodo.
- **Arranjo dos eletrodos:** a dimensão da célula, o espaçamento entre os eletrodos e o formato do eletrodo afetam o rendimento do processo eletroquímico.
- **Meio eletrolítico:** a escolha do eletrólito e a sua concentração, pH e temperatura.
- **Material de eletrodos:** para a degradação de contaminantes orgânicos, o material ideal do eletrodo deve ser completamente estável no meio de eletrolítico; barato; e exibir alta atividade frente à oxidação orgânica e baixa atividade nas reações secundárias (por exemplo, geração de gás oxigênio).

### 3 METODOLOGIA

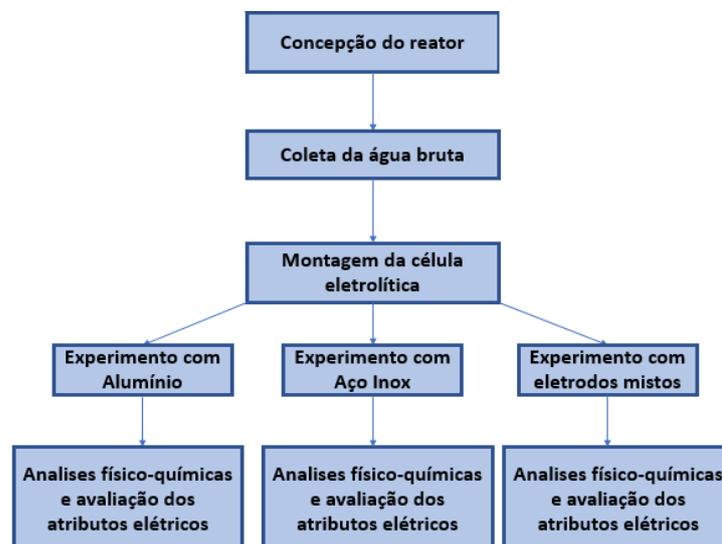
Este capítulo tem como objetivo abordar as etapas e os métodos utilizados no desenvolvimento desta pesquisa. A pesquisa aplicada foi realizada com o objetivo de gerar conhecimentos dirigidos à interpretação passível de solução dos problemas levantados.

#### 3.1 Classificação do método

Com intuito de esclarecer os malefícios que um manancial lacustre contaminado pode apresentar à saúde humana, bem como apresentar as vantagens de se clarificar esse recurso com processo eletrolítico, à revisão bibliográfica foi o ponto de partida da pesquisa. O conhecimento dos principais parâmetros de qualidade que são alterados nessas situações fora de grande importância para avaliar o desempenho deste tipo de tratamento aplicado diretamente na água bruta captada da Lagoa da Parangaba. O tipo de pesquisa elaborado foi qualitativo por meio da coleta de dados experimentais obtidos a partir das amostras coletadas *in loco*, que posteriormente foram analisados, a fim de obter uma conclusão a respeito do tema abordado. Sua classificação de acordo com o propósito foi do tipo descritivo e explicativo, pois se comparou os resultados desta pesquisa com outros trabalhos científicos que analisaram corpos hídricos contaminados.

A Figura 11 ilustra os procedimentos adotados para a realização da pesquisa e avaliação da qualidade da água em estudo.

Figura 11 – Fluxograma da metodologia da pesquisa



Fonte: Autor (2020).

### 3.2 Água de estudo

As amostras de água demandadas pelo estudo foram coletadas na Lagoa da Parangaba, localizada no município de Fortaleza no Estado do Ceará. Essa água utilizada nos experimentos apresenta características decorrentes de processos de contaminação e pode ser considerada como representativa das águas de outros mananciais da cidade que podem ser utilizados para o consumo humano.

A lagoa está inserida na bacia do Sistema Ceará/Maranguape, Fortaleza- CE, com a seguinte coordenação geográfica: 3°46'11.2"S/ 38°34'03.8"W.

A obtenção das coordenadas do objeto de estudo em questão pôde ser fornecida por meio de imagens de satélites através do programa Google Earth desenvolvido pela companhia Keyhole Inc ®, conforme ilustra a Figura 12.

Figura 12 – Localização geográfica da Lagoa de Parangaba (Fortaleza/CE)



Fonte: Adaptado pelo autor do site do Google Earth (2019).

### 3.3 Setup do experimento

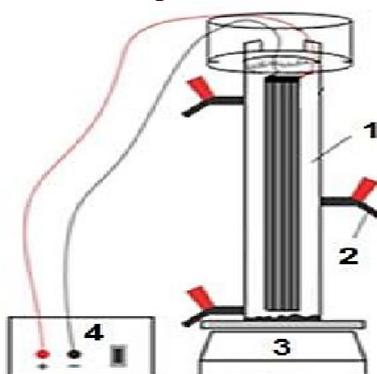
O sistema eletrolítico foi composto por um conjunto de eletrodos metálicos, sendo 02 pares de alumínio e 02 pares de aço inox 304, todos medindo 60x5x0,3 cm. Foi utilizando um circuito elétrico para converter a corrente contínua em corrente pulsada, a alimentação elétrica foi feita por uma fonte de tensão, estabilizada de 220-13,8V (Volts) para corrente elétrica de até 20A (Ampéres), fabricadas pela empresa Hayama. As conexões da fonte aos eletrodos foram realizadas por cabos elétrico do tipo PP 2 x 1,5 mm e bocais elétricos.

O reator eletrolítico, conforme detalhado na Figura 13, teve formato cilíndrico, de acrílico, com dimensões de 60,0 cm de altura e 10,0 cm de diâmetro, resultando em um volume

total de 4.710 cm<sup>3</sup>. Envolta da sua parte superior foi instalado um compartimento, também em formato cilíndrico, o qual tem como função coletar o material flotado (escuma) formado, impedindo-o de transbordar.

A coleta das alíquotas de efluente tratado foi realizada na torneira localizada na parte inferior do reator.

Figura 13 – Esboço do experimento utilizado na pesquisa: 1- Conjunto de eletrodos, 2 - Torneira de coleta, 3 - Suporte e 4 - Multímetro (voltímetro e amperímetro).



Fonte: Adaptado de Maia (2014).

Os conjuntos de eletrodos utilizados foram compostos por duas placas de aço inoxidável do tipo 304 e duas placas de alumínio 1050, conectadas por um arranjo bipolar em série, cada uma medindo 5 x 40 x 0,3 cm, resultando numa área superficial total de 800 cm<sup>2</sup>.

O conjunto de eletrodos utilizados e sua composição química estão presentes nas Tabelas 2 e 3 a seguir.

Tabela 2 – Percentual da composição química do aço inoxidável 304 utilizado nos experimentos

Composição química - Aço inoxidável 304 (%)							
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Fe
0,08	2,00	1,00	0,045	0,03	18,00	8,00	70,84

Fonte: Associação Brasileira do Aço Inoxidável (2014).

Tabela 3 – Percentual da composição química do alumínio 1050 utilizado nos experimentos

Composição química – Alumínio 1050 (%)							
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
0,25	0,4	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	99,5

Fonte: ABNT NBR ISO 209 (2010).

O distanciamento dos eletrodos foi de 5 mm entre as placas metálicas e a forma como eles foram formatados para, posteriormente, serem submersos na água de estudo, está exposto na Figura 14.

Figura 14 – Conjuntos de eletrodos utilizados nos ensaios.



Fonte: Autor (2019).

A potência consumida pelo sistema eletrolítico foi monitorada por meio de um wattímetro da marca Wanf. De acordo com Abdala Neto (2012), o tipo de corrente elétrica empregado neste trabalho foi elaborado com o intuito de provocar a geração de um campo elétrico uniformemente variado. Para isto, foi utilizada a fonte de tensão elétrica Hayama® HY-1320 Plus™ 220 V - 13,8 V 20 A, conectada a um circuito elétrico capaz de gerar pulsos de corrente, caracterizando-se como uma forma de aplicação de corrente contínua pulsada (CCP).

Este circuito elétrico foi configurado para emitir elétrons, em uma faixa de frequência regulável de 0 a 2200 Hz, aos eletrodos submersos na água bruta. Por outro lado, as moléculas presentes possuem também sua faixa de frequência vibratória natural, pois qualquer objeto formado por um material elástico, quando perturbado, vibrará com seu próprio conjunto

de frequências particulares, que juntas formam seu padrão de emissão. A isto se denomina de frequência natural da matéria, portanto desde planetas a átomos possuem elasticidade própria e vibram em uma ou mais frequência natural (ABDALA NETO, 2012).

A nova concepção tecnológica empregada nesse trabalho está na forma de como se deu a geração de energia no processo eletrolítico. De acordo com Abdala Neto (2012), ela foi baseada na geração de um campo elétrico uniformemente variado, capaz de promover a ruptura das ligações de moléculas, como, por exemplo, da ligação covalente da água.

Desta forma, buscou-se alcançar os deslocamentos causados por cada uma das ondas que ocupam determinado espaço ao mesmo tempo, por meio do princípio da superposição, quando duas ou mais delas se adicionam em cada ponto. Assim, quando a crista de uma onda se superpõe à crista de outra, seus efeitos individuais se somam e produzem uma onda resultante com amplitude maior (HEWITT, 2002; TIPLER; MOSCA, 2009).

Segundo Abdala Neto (2012), esse é um fenômeno caracterizado como ressonância que ocorre quando a frequência de vibração forçada de uma determinada matéria se iguala à frequência natural desta. Sendo este efeito alcançado quando é empregada uma força capaz de trazer a matéria a sua posição original e energia suficiente para mantê-lo vibrando.

Abdala Neto (2012) explicou que o processo eletrolítico baseado nestes princípios físicos apresenta muitas vantagens se comparado aos processos por eletrólise em corrente contínua comum, pois, além de seguir os aspectos do campo uniforme, este mecanismo de tratamento poderá ser favorecido de acordo com a frequência dos pulsos aplicada, através do fenômeno de ressonância, pois seria promovido o rompimento das ligações moleculares mais facilmente e em um intervalo de tempo menor, diminuindo, assim, o consumo de energia elétrica.

O campo elétrico é uma propriedade física estabelecida em todos os pontos do espaço que estão sob a influência de uma carga elétrica (TIPLER; MOSCA 2009; BISCUOLA; BÔAS; DOCA, 2007). No reator eletrolítico, o campo elétrico foi provocado entre placas metálicas submersas na água bruta da lagoa, de modo a exercer um momento em torno do eixo das moléculas polares que tendem a girar o dipolo para alinhá-lo com a direção do campo externo. Por meio da aproximação dos eletrodos planos e paralelos, eletricamente eletrizados, obtém-se, em todos os pontos de cada semi-espaço, um campo elétrico, tendo, em todos os pontos, a mesma intensidade, direção e o mesmo sentido (ABDALA NETO, 2012).

### 3.4 Procedimento experimental

Esse tópico tem como enfoque demonstrar como fora realizado a pesquisa de campo junto à coleta de dados de forma indireta e direta, através das análises experimentais baseadas na qualidade da água da lagoa da Parangaba localizada no Município de Fortaleza-CE.

#### 3.4.1 Descrição dos experimentos

A execução dos experimentos se deu em regime de batelada, onde foram adicionados ao reator de acrílico 2,5 L de água bruta (água da Lagoa da Paramgaba) e em seguida, os eletrodos eram inseridos de maneira que ficassem submersos na água bruta.

Primeiramente, fora submerso os eletrodos de alumínio onde eram checadas as ligações e acionado o cronômetro. Para início dos experimentos era acionado o interruptor que fechava o circuito, dando início a experimentação. Após a aferição dos ensaios com a água tratada pelo processo, o reator de acrílico era lavado e toda a preparação se repetia para o uso do outro conjunto de eletrodos, agora de aço inox 304.

Para cada par de eletrodo (aço inox e alumínio) e com as 4 placas de eletrodo (2 aço inox juntas com as 2 de alumínio - Misto), foram realizados 7 experimentos sendo cada um por 21 minutos.

A cada 3 minutos eram coletadas amostras de 50 mL de água tratada eletroliticamente, as quais eram armazenadas em tubos de falcon e refrigeradas para posterior análises físico-químicas.

A lavagem dos eletrodos foi feita com esponja e sabão ao final de cada experimento para extração de possíveis materiais aderidos durante o tratamento, como realizado por Sinoti e Souza (2005).

#### 3.4.2 Caracterização físico-química da água estudada

As análises físico-químicas das amostras de água bruta e tratada pelo processo eletrolítico estudado, foram realizadas no Laboratório H<sub>2</sub>O ANALYSIS.

As análises foram realizadas em duplicata e os parâmetros físico-químicos foram determinados segundo metodologias recomendadas pela American Public Health Association (APHA, 2017).

Após a coleta nos tempos previamente estabelecidos e já aventados, as alíquotas ficavam em repouso (devidamente refrigeradas).

Os parâmetros físico-químicos avaliados, que serviram de base para aferir a efetividade do processo na clarificação da água de estudo, seguiram as diretrizes dos padrões de potabilidade estabelecidos pelo Anexo XX Portaria de Consolidação N° 5/2017 do Ministério da Saúde do Brasil.

Foram monitorados parâmetros diretamente nos instrumentos de medida, conforme listados abaixo, seguindo seus respectivos métodos analíticos e referências.

#### **Análises físico-químicas**

- Turbidez - valores medidos com turbidímetro de bancada, fabricado pela Hach Company, modelo 2100P. 87;
- Condutividade - valores medidos com equipamento portátil, fabricado pela NEW TDSseEC meter, modelo A;
- pH - Potencial Hidrogeniônico – valores medidos através de potenciômetro fabricado pela Analion, modelo PM 608 e eletrodo combinado fabricado pela Analyser, modelo 2A13-FL;

#### **Atributos elétricos**

- Além desses parâmetros, também foi realizado o monitoramento da potência e da temperatura, nos mesmos intervalos de tempo.
- Corrente e tensão elétrica – valores medidos por instrumento digital portátil, fabricado por Minipa modelo ET-1100 com a categoria II 600 V de segurança. Realizaram-se medidas de tensão elétrica e corrente elétrica.

### **3.5 Avaliação econômica da energia consumida pelo processo aplicado**

O estudo de viabilidade econômica com o uso do processo eletrolítico operado com energia elétrica, aplicado conforme as condições estudadas nesta pesquisa, foi obtido pelo cálculo do consumo energético a partir da equação (8) (KOBYA *et al.*, 2006).

$$C_{\text{energia}} = \frac{U.I.T}{V} \quad (8)$$

Em que:

$C_{\text{energia}}$  → é a energia consumida ( $\text{Wh m}^{-3}$ );

$U$  → a tensão elétrica aplicada (V);

$I$  → a corrente elétrica (A);

$T$  → o tempo de aplicação da corrente elétrica (h);

$V$  → o volume de efluente tratado ( $\text{m}^3$ ).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo objetiva-se detalhar o funcionamento do mecanismo de tratamento por meio do reator de acrílico alimentado por energia elétrica conectado a uma fonte estabilizadora de energia, para controlar a tensão elétrica aplicada, bem como verificar a eficiência de tratamento de cada placa e do conjunto de placas simultaneamente. Além disso, avaliar os benefícios que o tratamento oferece em comparação à água que recebe efluente doméstico.

### 4.4 Caracterização da água de estudo

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos na determinação dos parâmetros físico-químicos do efluente bruto utilizado no estudo. Também é apresentado os valores máximos permitidos estabelecidos pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação N° 5/2017, do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2017), legislação que determina o padrão de potabilidade das águas de abastecimento para consumo humano.

Tabela 4 – Características físico-químicas do efluente utilizado no estudo

(continua)

Parâmetro	Resultado	VMP - PRC N°5 Anexo XX	Unidade
<b>pH à 25°C</b>	7,430	6,0 a 9,5	U pH
<b>Alcalinidade Parcial</b>	<2,000	N.A	mg/L
<b>Alcalinidade Total</b>	77,310	N.A	mg/L
<b>Amônia (NH<sub>3</sub>)</b>	<0,100	até 1,500	mg/L
<b>Bicarbonatos</b>	77,310	N.A	mg/L
<b>Cálcio</b>	21,350	N.A	mg/L
<b>Carbonatos</b>	<2,000	N.A	mg/L
<b>Cloretos</b>	52,110	até 250,000	mg/L
<b>Condutividade</b>	348,200	N.A	µS/cm
<b>Cor Aparente</b>	<10,000	até 15,000	uH
<b>Determinação de Aspecto</b>	COLORAD O	N.A	*
<b>Dureza Total</b>	94,700	até 500,000	mg/L

Tabela 4 – Características físico-químicas do efluente utilizado no estudo

(conclusão)

<b>Parâmetro</b>	<b>Resultado</b>	<b>VMP - PRC N°5 Anexo XX</b>	<b>Unidade</b>
<b>Estimativa de TDS</b>	236,78	até 1.000,000	mg/L
<b>Ferro</b>	0,450	até 0,300	mg/L
<b>Hidróxido</b>	<2,000	N.A	mg/L
<b>Magnésio</b>	10,06	N.A	mg/L
<b>Nitratos</b>	<1,000	até 10,000	mg/L NO <sub>3</sub> -N
<b>Nitritos</b>	<0,050	até 1,000000	mg N-NO <sub>2</sub> -/L
<b>Potássio</b>	4,3	N.A	mg/L
<b>Sódio</b>	34,7	até 200,000	mg/L
<b>Sulfato</b>	23,57	até 250,000	mg/L
<b>Turbidez</b>	10,96	até 5,0	UNT

Fonte: H<sub>2</sub>O Analyses (2020).

Observa-se pela Tabela 4 que os valores de Ferro (0,45mg/L) e Turbidez (10,96 UNT) demonstraram que a água de estudo, no seu estado bruto (sem tratamento), se encontrava em desconformidade com os valores estabelecidos pela Anexo XX da Portaria de Consolidação N° 5/2017, do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2017). As alterações nos valores desses parâmetros na amostra de água, podem indicar a necessidade de um tratamento de clarificação do manancial em estudo.

Quanto ao valor de pH (7,43), a água apresenta-se levemente básica e atendendo ao preconizado na legislação que estabelece os padrões de potabilidade, o Anexo XX da Portaria de Consolidação N° 5/2017, do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2017).

#### 4.5 Concepção do reator eletrolítico

Para o reator construído, o material acrílico foi preferido por possibilitar um melhor acompanhamento dos processos eletrolíticos envolvidos através da sua transparência. Quanto ao formato escolhido do tipo cilíndrico, foi utilizado a fim de proporcionar uma excelente área de contato do efluente com os eletrodos, como também evitar cantos “mortos” dentro do reator, como acontece em reatores de formato tipo tanque (cúbico).

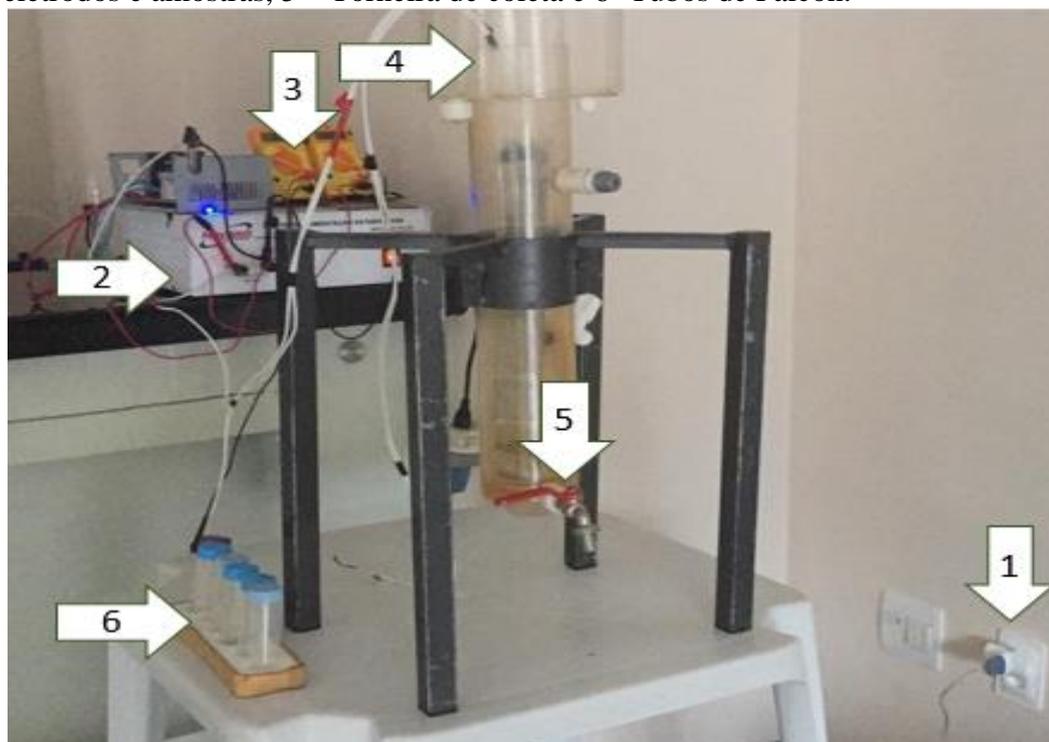
O regime hidráulico escolhido foi do tipo batelada. Isso possibilitou maior facilidade de acompanhamento das reações do sistema.

O circuito externo era composto fios de cobre condutores ligados diretamente entre a fonte de alimentação elétrica, o circuito conversor de corrente contínua pulsada e os eletrodos. Todas as ligações elétricas foram devidamente isoladas com fita isolante para que não houvesse perdas devido ao calor. Juntamente houve a conexão dos cabos para teste que foram conectados aos multímetros digitais.

Os instrumentos de medição para parâmetros elétricos, multímetros, foram ligados ao sistema objetivando medir a corrente elétrica aplicada ao circuito e a tensão sobre os eletrodos submersos na água bruta. A Figura 12 apresenta a formatação do set-up, onde a bancada foi usada para proporcionar melhor visibilidade ao operador.

Os tubos de Falcon (50mL) para a coleta das alíquotas de água tratada durante o experimento e ficavam na parte inferior esquerda do reator, proporcionando melhor facilidade na operação das coletas em cada intervalo de tempo estudado.

Figura 15 – Sistema eletrolítico implementado: 1- Fonte de energia, 2- Fonte estabilizadora, 3 - Multímetros (voltímetro e amperímetro), 4 – Entrada dos eletrodos e amostras, 5 – Torneira de coleta e 6- Tubos de Falcon.



Fonte: Autor (2020).

#### 4.6 Resultados da eficiência de tratamento utilizando eletrodos de alumínio

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos utilizando-se 2 eletrodos de alumínio no processo eletrolítico estudado. Observou-se que a o parâmetro de turbidez que apresentava na água bruta valor de 10,96 UNT, teve aumento já nos primeiros 6 minutos de experimento. Possivelmente, ocorreu devido ações de oxidação dos sólidos dissolvidos que precipitando incorporaram partículas suspensas à solução.

Observou-se também que a turbidez diminui em valores, para tempos de experimentos acima de 6 minutos, sendo o menor valor 3,24 UNT no tempo de 18 minutos e o maior no tempo 3 minutos do experimento de 15,37 UNT. A ação da eletrocoagulação juntamente com a eletroflotação, podem ter carregado (flotação) as partículas suspensas que causam turbidez para o acúmulo de sólidos na superfície da solução, denominada de material flotado).

Percebeu-se visualmente, que durante o tratamento eletrolítico das amostras utilizando eletrodos de alumínio, um residual de coloração branca, muito intensa, devido a formação do  $\text{Al(OH)}_3$ .

Nos experimentos realizados, observou-se a tendência do potencial hidrogeniônico de se elevar. Otenio (2010) explicita que durante o processo eletroquímico de coagulação a produção de  $\text{H}_2$  no cátodo elevará a concentração de  $\text{OH}^-$ , assim o pH da solução aquosa aumentará quando o pH da água bruta estiver na faixa de 4 – 9.

A amplitude de variação da tensão elétrica para os eletrodos de alumínio obteve pouca oscilação durante a operação do reator, ficando entre os valores de 13,50 V e 13,54 V, bem como a amplitude de corrente elétrica, 1,30 A e 1,40 A. Isto mostra uma certa estabilidade no funcionamento elétrico da célula eletrolítica.

Para tempos acima de 18 minutos observou uma queda nos resultados de remoção de turbidez, onde no tempo 21 minutos obteve-se 78% de remoção enquanto, para o tempo de 18 minutos, a remoção foi de 79%. Desta forma, optou-se por estabelecer o tempo de 18 minutos como o de melhor resultados para a clarificação, com base nos valores de turbidez.

Tabela 5 – Resultados obtidos com eletrodo de Alumínio

Tempo(min.)	pH	Turbidez		Temperatura(°C)	Corrente elétrica(A)	Tensão elétrica(V)
	Final	Final	Remoção (%)			
3	5,84	15,37	0	29	1,33	13,50
6	6,06	14,1	8	28	1,33	13,53
9	6,04	8,04	48	28	1,30	13,52
12	6,01	5,47	64	28	1,40	13,53
15	5,99	3,86	75	28	1,40	13,54
18	6,00	3,24	79	28	1,32	13,52
21	6,01	3,32	78	28	1,33	13,50

Fonte: Autor (2020).

A Tabela 6 apresenta a condutividade elétrica obtida durante os experimentos juntamente com o custo energético demandado pelo tratamento em cada tempo estudado. Observou-se que a condutividade apresentou decréscimo contínuo durante a experimentação, onde provavelmente houve consumo de íons na solução, denotando essa diminuição iônica.

A redução da condutividade obteve maior percentual no intervalo de 9 minutos, atingindo 234  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , reduzindo 36% do valor da primeira medição que foi 368,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  no tempo de 3 minutos. Isso pode estar relacionado a consumação dos íons durante a processo eletrolítico, o que pode ser benéfico ao tratamento.

O aumento no gasto energético, mesmo com a redução da condutividade elétrica, é ocasionado pela redução da porção de água tratada, retirada a cada coleta no tubo de Falcon.

Tabela 6 – Condutividade elétrica e gasto energético para o alumínio

Tempo(h)	Condutividade( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		Gasto energético ( $\text{Wh}/\text{m}^3$ )
	Final	Redução (%)	
0,05	368,2	0	359,1
0,1	263,5	28	734,5
0,15	234,0	36	1098,5
0,2	238,8	35	1612
0,25	239,7	35	2060,4
0,3	257,8	30	2379,5
0,35	259,7	29	2856,5

Fonte: Autor (2020).

#### 4.7 Resultados de eficiência de tratamento utilizado eletrodos de aço inox

A Tabela 7 demonstra os resultados utilizando 2 eletrodos de aço Inox 304. Foi observado que o parâmetro de turbidez que apresentava na água bruta (10,96 UNT), sofreu um aumento também nos primeiros 6 minutos de aplicação do processo eletrolítico.

Entretanto, a partir desse intervalo de tempo, a turbidez diminui em valores, embora com percentuais um pouco menores que os resultados do eletrodo de alumínio. O tempo em que houve o melhor resultado de turbidez para os eletrodos de aço inox 304 foi considerado o de 12 minutos, em que a turbidez obtida foi de 5,48 UNT, atingindo assim 73% se comparada ao tempo de 3 minutos que foi 20,26 UNT. Observa-se ainda que, nos tempos a partir de 6 minutos de operação a turbidez inicia um decréscimo atingindo 5,48 UNT em 12 minutos e depois começa a aumentar com o passar do tempo de tratamento.

A diminuição dentro do intervalo de tempo supracitado pode ter influência na remoção da presença de matéria sólida em suspensão, matéria orgânica e inorgânica finamente divididas, organismos microscópicos ou algas.

O pH atingiu valor aproximado de 6,47, aproximando-se mais da alcalinidade no tempo de 18 minutos. O processo eletrolítico produz reações tanto no ânodo quanto no cátodo. A justificativa para o acréscimo nos valores de pH se deve ao fato de ocorrer à redução de

moléculas de água na superfície do cátodo, gerando o íon hidroxila, sendo este a espécie química responsável pelo aumento do pH.

Tabela 7 – Resultados obtidos com eletrodo de Aço Inox

Tempo(min.)	pH	Turbidez		Temperatura(°C)	Corrente elétrica(A)	Tensão elétrica(V)
	Final	Final	Remoção (%)			
3	6,33	20,26	0	29	1,30	13,62
6	6,22	13,41	34	28	1,29	13,62
9	6,25	7,58	63	28	1,35	13,61
12	6,23	5,48	73	28	1,32	13,62
15	6,35	6,35	69	28	1,29	13,61
18	6,47	6,3	69	28	1,29	13,61
21	6,45	6,5	68	28	1,31	13,62

Fonte: Autor (2020).

O eletrodo de aço, quando aplicado ao tratamento, apresentou a desvantagem de contribuir com cor residual verde ou amarela bastante forte, diferentemente da coloração mais clara proporcionada no uso dos eletrodos de Alumínio. Esta coloração é, possivelmente, proveniente dos íons  $Fe^{2+}$  (cor verde) e  $Fe^{3+}$  (cor amarela) gerados no tratamento eletrolítico que oxidam os eletrodos de aço inox lançando o ferro na solução.

A Tabela 8 apresenta os valores de condutividade elétrica em cada intervalo de tempo estudado. A tendência de valores de condutividade acompanhou os resultados obtidos na turbidez, porém o gasto energético não seguiu essa tendência de diminuição, ou seja, a eficiência se torna mais viável no tempo de 12 minutos (0,2h) pois o gasto é menor que o de tempos maiores, obtendo melhor resultado de remoção.

Tabela 8 – Condutividade elétrica e gasto energético para o tratamento com Aço Inox

Tempo(h)	Condutividade( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		Gasto energético ( $\text{Wh}/\text{m}^3$ )
	Final	Redução (%)	
0,05	486,1	0	354,1
0,1	312,0	36	717,1
0,15	261,6	46	1148,3
0,2	225,4	54	1530,1
0,25	251,1	48	1908,4
0,3	263,5	46	2340,9
0,35	266,3	45	2838,5

Fonte: Autor (2020).

#### 4.8 A eficiência de tratamento utilizando eletrodos de alumínio e aço inox

Para o processo eletroquímico utilizando os eletrodos de forma agrupada (misto) foi visto que, diferentemente dos valores de tratamento na forma individual, houve crescimento nos valores de turbidez em relação a água bruta (10,96 UNT), apenas nos primeiros 3 minutos de aplicação do processo. A partir desse intervalo de tempo, a turbidez também diminuiu com percentuais melhores que os demais.

O tempo em que houve o melhor resultado de turbidez (1,03 UNT) é considerado o de 18 minutos, em que o parâmetro alcançou uma remoção de 93% em relação aos primeiros 3 minutos de experimento. Sendo esse o melhor resultado obtido nessa disposição de eletrodos e o que mais se ficou abaixo do limite permitido de 5 UNT, estabelecido pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação N° 5/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017) no tempo semelhante aos eletrodos utilizados de forma individual.

É possível verificar que a adequação de parâmetros físico-químicos ao estabelecido pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação N° 5/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017), quando se utiliza eletrodos misto, apresenta resultados acima dos alcançados pelo uso individual de eletrodos de aço e alumínio. Percebeu-se tal comportamento no pH que oscilou

entre 7 e 9, indicando a maior produção de  $\text{OH}^-$ , se considerarmos os valores para intervalos abaixo de 18 minutos com o uso do eletrodo misto.

Percebe-se, ainda que a temperatura, sendo um catalisador de reações, não é um fator que interfere no sistema, ou seja, pela análise do experimento, não foi possível verificar perda de qualidade do tratamento devido à temperatura.

Apesar do menor resultado obtido para condutividade ter sido no tempo de 21 minutos, isso não se observa para os parâmetros de turbidez e pH, visto que o pH de 10,11 ultrapassa o valor recomendado pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação N° 5/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017) e o valor de turbidez demonstra uma tendência de aumentar novamente.

Tabela 9 – Resultados obtidos com aplicação dos eletrodos mistos

Tempo(min.)	pH	Turbidez		Temperatura(°C)	Corrente elétrica(A)	Tensão elétrica(V)
	Final	Final	Remoção (%)			
3	7,2	13,78	0	28	1,75	13,42
6	7,54	6,86	50	28	1,69	13,41
9	7,50	5,94	57	27	1,74	13,42
12	7,86	4,5	67	27	1,61	13,41
15	7,97	3,22	77	27	1,63	13,43
18	8,11	1,03	93	27	1,55	13,43
21	10,8	2,64	81	27	1,60	13,42

Fonte: Autor (2020).

No aspecto de custo energético, observa-se pela Tabela 10 se comparado as formas de tratamento anteriores se demonstram um pouco mais elevados, isso é ocasionado pela demanda energética ter sido maior pela utilização do conjunto de eletrodos misto.

O mesmo efluente ao ser tratado com diferentes correntes elétricas, registrou condutividades muito próximas. Porém, as variações de tensão e corrente elétrica não geraram alterações significativas.

Tabela 10 – Condutividade elétrica e gasto energético para o tratamento com Alumínio e Aço Inox

Tempo(h)	Condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )		Gasto energético ( $\text{Wh}/\text{m}^3$ )
	Final	Redução (%)	
0,05	305,4	0	469,7
0,10	290,2	5	925,0
0,15	208,3	32	1459,4
0,20	191,2	37	1837,5
0,25	190,3	38	2379,4
0,3	188,4	38	2775,5
0,35	186,5	39	3416

Fonte: Autor (2020).

Ao analisar os valores obtidos de condutividade tratando a água de estudo, observa-se que quanto menor o número de eletrodos utilizados, maior foram os valores para a condutividade no meio.

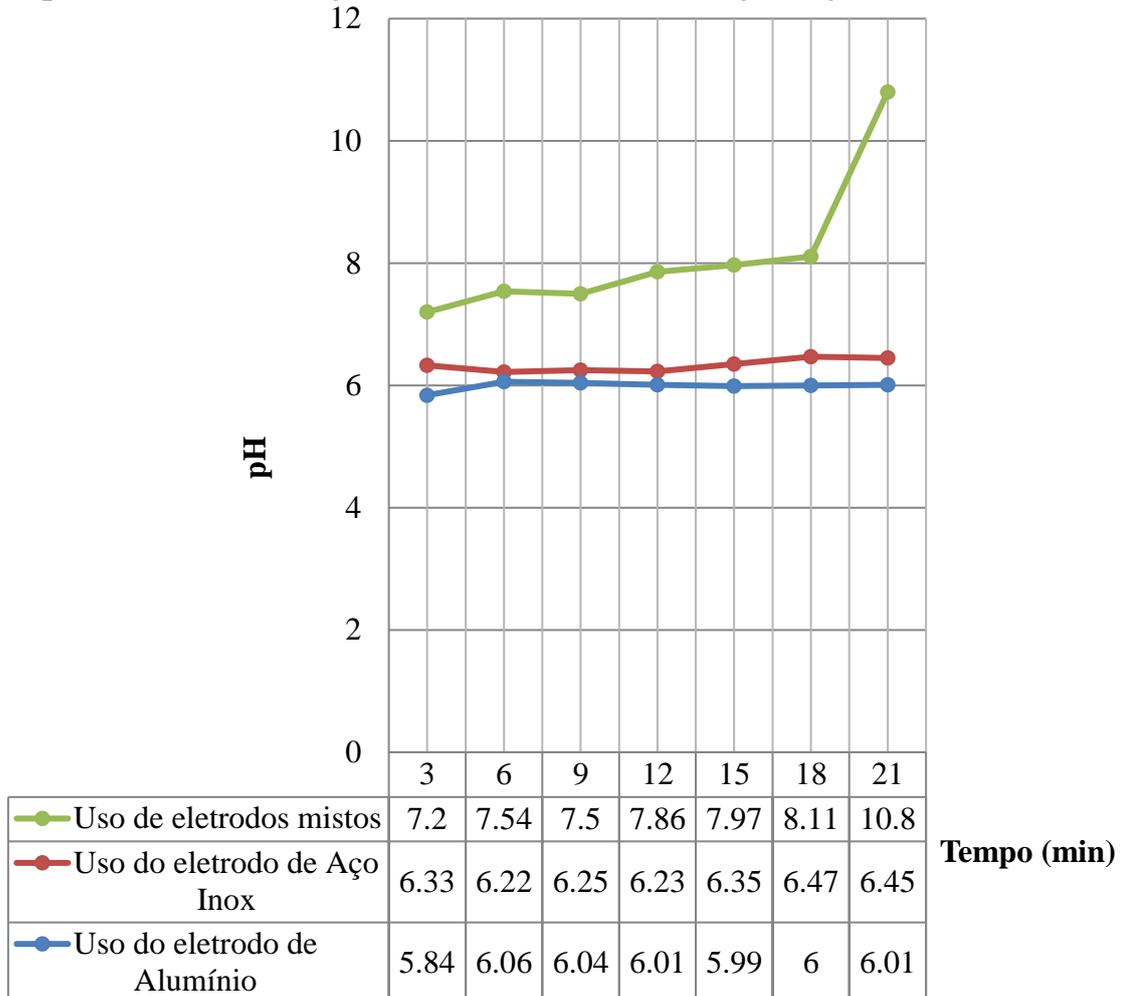
#### 4.9 Comparação entre os resultados obtidos

De acordo com os resultados apresentados nas seções anteriores, apresenta-se a seguir nas Figuras 16, 17 e 18, gráficos comparativos no uso dos eletrodos de alumínio, aço inox e misto (inox associado ao alumínio), no que diz respeito aos parâmetros: pH, Turbidez e Condutividade.

Conforme observa-se na Figura 16, há uma tendência do pH se manter levemente ácido durante todo o experimento para as amostras tratadas, utilizando os eletrodos de aço inox e alumínio, de forma individual.

Para os eletrodos na sua disposição mista, há uma tendência desse parâmetro de alcançar caráter alcalino, conforme observado já nos primeiros minutos de experimentação, atingindo o melhor resultado no tempo de 18 minutos.

Figura 16 – Gráfico comparativo dos resultados obtidos para o pH

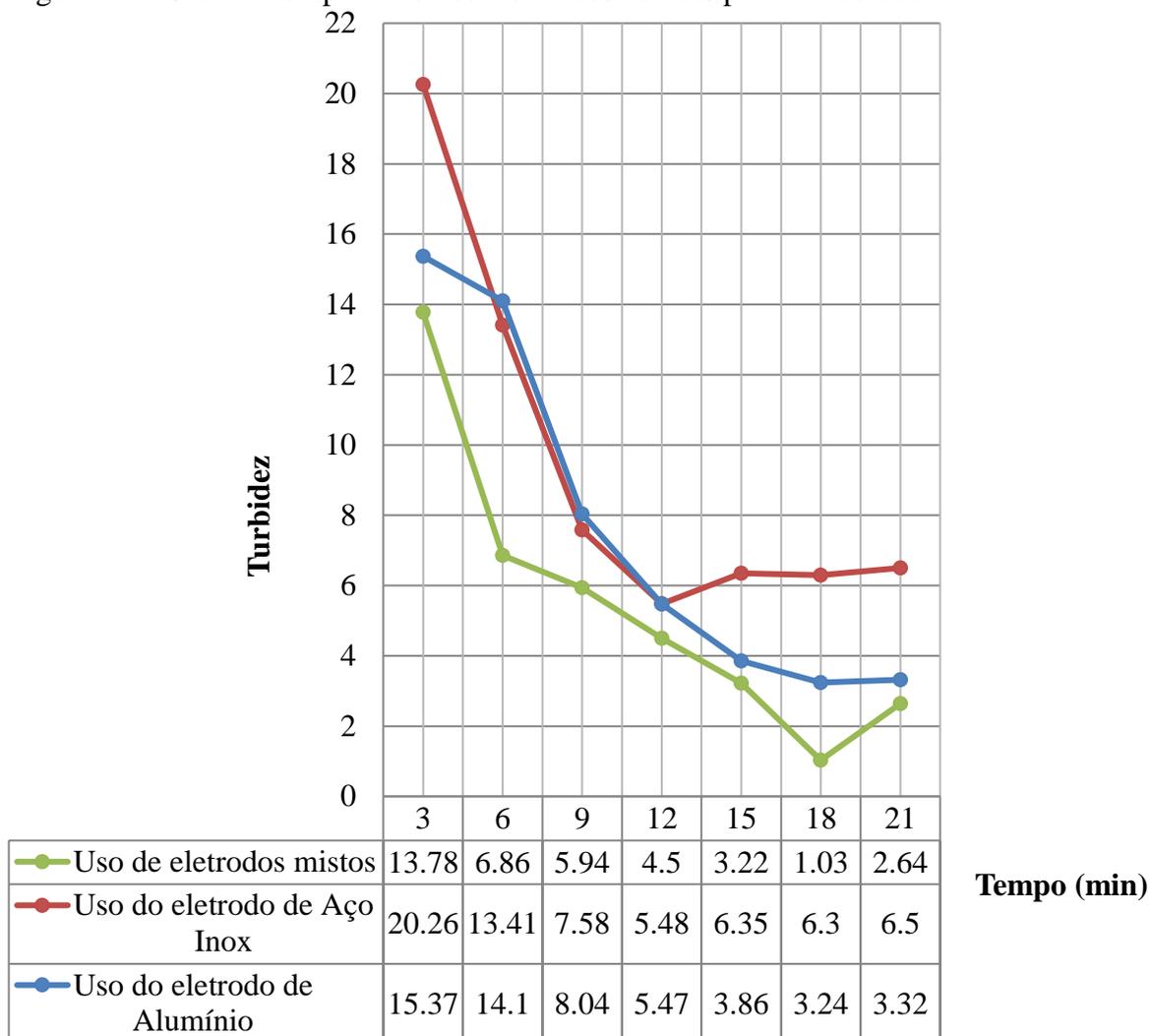


Fonte: Autor (2020).

Na Figura 17, observa-se para o parâmetro turbidez ao longo do tempo de experimentação utilizando as três disposições diferente (eletrodos de aço inox, alumínio e misto), um aumento nos primeiros minutos iniciais, seguindo uma tendência também de redução para o tempo restante de experimentos.

Ainda avaliando a Figura 17, percebe-se que o uso dos eletrodos misto atinge a maior redução no tempo de 18 minutos após início dos experimentos.

Figura 17 – Gráfico comparativo dos resultados obtidos para a Turbidez

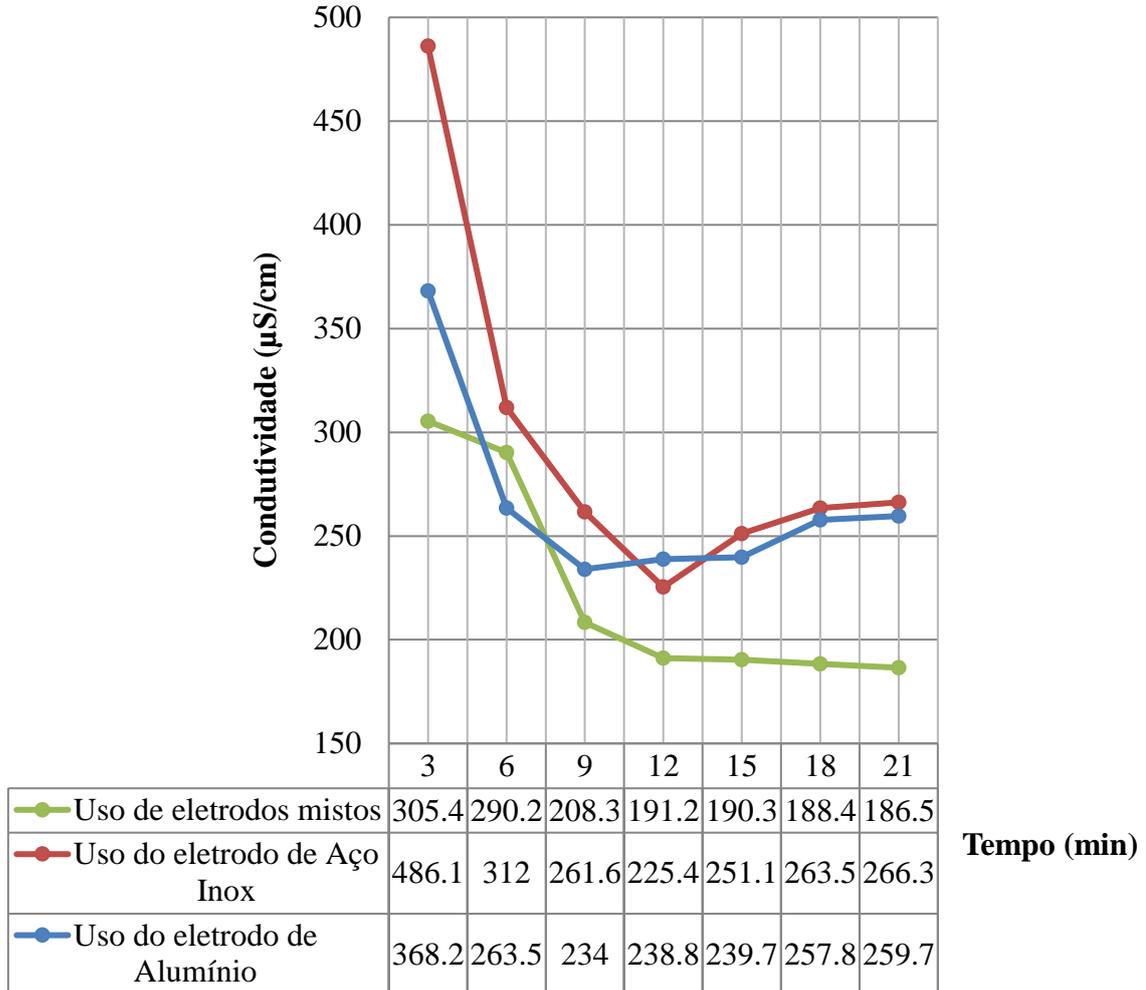


Fonte: Autor (2020).

A Figura 18 apresenta valores obtidos para o parâmetro condutividade elétrica nas experimentações. Observa-se que os maiores valores iniciais de condutividade foram alcançados com os eletrodos de aço inox e os menores com os eletrodos mistos.

Além disso, há uma tendência de diminuição desses valores com o passar do tempo de experimento. Desse modo, pode-se avaliar os eletrodos na sua disposição mista, como a forma que mais fez a consumação dos íons presentes na água, já que quanto maior a consumação menor a condutividade encontrada. Concomitantemente a isso, há um melhor resultado para os parâmetros avaliados, já que esse parâmetro demonstra a eficiência de tratamento dos eletrodos.

Figura 18 – Gráfico comparativo dos resultados obtidos para a Condutividade



Fonte: Autor (2020).

#### 4.10 Avaliação dos custos de implementação dos processos

Esse tópico visa estimar o custo do tratamento do sistema de eletrocoagulação/flotação/oxidação em escala piloto, nas condições aqui estudadas bem como para os resultados obtidos na água de estudo.

A Tabela 11 apresenta os valores de gastos energéticos referentes a cada experimento realizado com os diferentes tipos de eletrodos. Observou-se que ocorreu um aumento médio de cerca de 22% no custo energético quando aplicado o tratamento com os eletrodos de alumínio em comparação com o eletrodo misto.

E quando se compara os experimentos realizados com eletrodo de aço inox e misto, este último apresentou aumento de 24%. Tal fato pode ter sido ocasionado pela maior área de contato, quando se utiliza os eletrodos mistos que contém 04 unidades de eletrodos, o dobro dos eletrodos de aço e alumínio.

Tabela 11 – Comparativo entre os gastos energéticos referentes a cada experimento realizado com os diferentes tipos de eletrodos

Tempo (h)	Alumínio	Aço Inox	Eletrodos Mistos
	Gasto energético (Wh/m <sup>3</sup> )	Gasto energético (Wh/m <sup>3</sup> )	Gasto energético (Wh/m <sup>3</sup> )
0,05	359,1	354,1	469,7
0,1	734,5	717,1	925,0
0,15	1098,5	1148,3	1459,4
0,2	1612,1	1530,1	1837,5
0,25	2060,4	1908,4	2379,4
0,3	2379,5	2340,9	2775,5
0,35	2856,5	2838,5	3416,0

Fonte: Autor (2020).

Dessa forma foi avaliado os melhores resultados de cada experimento, ou seja, os tempos em que houve melhor tratamento para os parâmetros analisados e estimou-se o custo para se tratar cada volume de água.

Na Tabela 12 mostra-se a comparação dos custos energéticos para os tempos experimentados que apresentaram os melhores resultados de remoção de Turbidez e pH alcalino. De acordo com as tarifas normais B1 estabelecida pela ENEL (2020), é estabelecido que nas tarifas aplicadas a clientes atendidos em baixa tensão, para consumo até 200 kWh, o valor pago será de aproximadamente R\$0,77 centavos para cada kWh consumido.

O volume útil do reator foi convertido para m<sup>3</sup> e os valores de gastos energético foram calculados em kWh/m<sup>3</sup>. Para o uso dos eletrodos de alumínio obteve-se 2,38 kWh/m<sup>3</sup>, para o eletrodo de aço inox foi de 1,53 kWh/m<sup>3</sup> e com o uso dos eletrodos de forma mista obteve-se valor de 2,77 kWh/m<sup>3</sup>.

Quanto ao custo energético, os valores obtidos foram de R\$1,83 e R\$1,18/m<sup>3</sup> para os experimentos realizados com os eletrodos de alumínio e aço, respectivamente. Em relação ao custo benefício do processo utilizando os eletrodos de forma individual, pode-se afirmar que nos eletrodos de alumínio, o custo operacional fica mais elevado quando comparado aos eletrodos de aço.

Embora, o gasto energético tenha alcançado maiores valores no uso dos eletrodos mistos, estes foram os que obtiveram os melhores resultados de remoção de turbidez e tornaram

o pH mais alcalino. Logo, foi avaliado apenas o custo operacional desse modo de disposição eletrolítica para um mês de aplicação, tratando 2,5 L de água contaminada.

Apenas considerando o tempo de aplicação de 18 min (0,3h), temos que o sistema eletrocoagulação/flotação/oxidação para os eletrodos misto teve um gasto energético de 2,77 kWh/m<sup>3</sup>. Ao aplicar o valor da tarifa energética de R\$ 0,77/kWh podemos encontrar um valor de R\$ 2,13/m<sup>3</sup> a ser gasto apenas com a energia elétrica.

Tabela 12 – Valores de Gastos e Custos obtidos para os melhores resultados alcançados pelos eletrodos estudados

<b>Experimento</b>	<b>Gasto energético (kWh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Custo energético (R\$/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Alumínio (18 min)</b>	2,38	1,83
<b>Aço Inox (12 min)</b>	1,53	1,18
<b>Eletrodos Misto (18 min)</b>	2,77	2,13

Fonte: Autor (2020).

## 5 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nos experimentos com a aplicação de uma célula eletrolítica na clarificação de água contaminada da Lagoa da Parangaba, foram satisfatórios para os parâmetros avaliados, tornando-os dentro dos limites estabelecidos pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação N° 5/2017 do Ministério da Saúde.

Quando utilizados os eletrodos de alumínio atingiu-se, em 18 minutos de operação da Célula Eletrolítica, remoção de 79% dos valores de turbidez. Porém, não foi capaz de elevar o pH a valores de neutralidade e ou alcalinidade, ficando em pH 6,00.

Além disso, para o eletrodo de aço inox foi possível obter uma remoção de 73%, em 12 minutos de operação da Célula Eletrolítica, atingindo um pH de 6,23 apresentando um caráter ácido.

Aplicando-se eletrodos misto, obteve-se a máxima eficiência da Célula Eletrolítica utilizada na clarificação de águas urbanas contaminadas, com remoção de turbidez alcançando 93%, no tempo de 18 minutos de operação. Nesta condição estudada, também se obteve um pH alcalino de 8,11, com o reator operando com a condutividade elétrica abaixo de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Desta forma, a água tratada enquadra-se, nos parâmetros estudados, à legislação prevista no Anexo XX da Portaria de Consolidação N° 5/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017)

Conclui-se ainda, que utilizar os eletrodos mistos indica uma presença maior de resíduos produzidos, em relação aos outros eletrodos estudados, redundando em uma melhor performance da célula no tratamento pretendido.

O custo de implementação em escala piloto do tratamento do sistema de eletrocoagulação/flotação/oxidação para a disposição mais eficiente dos eletrodos no sistema foi de R\$ 2,13/m<sup>3</sup> a ser gasto apenas com a energia elétrica.

O reator de acrílico desenvolvido nesse estudo pode ser facilmente projetado para grandes volumes de amostra, uma vez que ele pode ser construído com materiais de baixo custo como plástico, acrílico, aço, alumínio, e também depende apenas do número de eletrodos e da potência da fonte energética utilizada; dessa forma há possibilidade real de aplicação desta tecnologia em várias escalas.

O tratamento por processo eletrolítico, nas condições em que foram estudadas, pode ser considerado uma alternativa viável para o tratamento de água, no que se refere a clarificação de águas que recebem despejos indevidos de efluentes doméstico, observando os parâmetros utilizados neste trabalho, bem como as ressalvas levantadas.

Seguem algumas recomendações que se fazem relevantes para trabalhos futuros:

- Analisar a passivação e o desgaste dos eletrodos;
- Avaliar o resíduo de lodo gerado e propor soluções;
- Utilizar fontes de tensão elétrica diferentes para obtenção de correntes variadas.
- Tornar o regime hidráulico contínuo da célula eletrolítica.

## REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional da Saúde. **Manual de controle de qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAs**. Brasília:FUNASA, 1 ed. 2014. 112 p.
- ABDALA NETO, E. F. **Pré e pós-tratamento por eletro-oxidação associada à fotocatalise heterogênea em uma ETA por filtração direta visando a redução dos precursores dos compostos organoclorados**. 2012. 228 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 19. **WASHINGTON: APHA, AWWA, WPCF**, 2005.
- AQUINO NETO, S; MAGRI, T. C; SILVA, G. M; ANDRADE, A. R. Tratamento de Resíduos de Corante por Eletrofloculação: Um Experimento para Cursos de Graduação em Química. **Química Nova**,v.34, n.8, p.1468-1471, 2011.
- ARAÚJO, Karla Santos de; ANTONELLI, Raissa; GAYADÉCZKA, Beatriz; GRANATO; MALPASS, Geoffroy Roger Pointer. **Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais**. Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science ISSN 1980-993X – doi:10.4136/1980-993X. Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFMT), Uberaba, MG, Brasil. Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 209:2010** Alumínio e suas ligas – Composição química. Rio de Janeiro, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AÇO INOXIDÁVEL. **Coletânea de informações técnicas – Aço inoxidável, Composição química e aplicações dos aços inoxidáveis**. 9 p. Disponível em: <https://www.abinox.org.br/upfiles/arquivos/biblioteca/composicao-quimica.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2019.
- ATKINS, Peter; JONES, Loretta. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- BARBOSA, Francisco Luan Almeida. **A eutrofização dos recursos hídricos no estado do Ceará**. 2017. 49 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, O Departamento de Economia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em: [http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/30981/1/2017\\_tcc\\_flabarbosa.pdf](http://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/30981/1/2017_tcc_flabarbosa.pdf). Acesso em: 11 set. 2019.
- BAYAR, S.; YILDIZ, S. Y.; YILMAZ, E. A.; IRDEMEZ, S. *The effect of stirring speed and current density on removal efficiency of poultry slaughterhouse wastewater by electrocoagulation method*. **Desalination**, v. 280, p.103-107, 2011.

BIDOIA E. D.; NOTOYA, E. Y. Tratamento Eletrolítico de Efluente Contendo Fenol com Eletrodos DSA. **Arq. Inst. Biol.**, v. 71, p. 1-749, 2004.

BISCUOLA, J. G.; BÔAS N. V.; DOCA, R. H. **Tópicos de física 3: eletricidade, física moderna e análise dimensional**. 17. ed. São Paulo: Saraiva, 2007.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº5, de 28 de setembro de 2017. **Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde**. Diário Oficial da União, Brasília, 2017.

CAGECE. **Companhia de Água e Esgoto do Ceará: Governo do Estado do Ceará**. Disponível em: <http://www.cagece.com.br/>. Acesso em: 22 out. 2019.

CHIANG, Li-Choung; CHANG, Juu-En; WEN, Ten-Chin. *Indirect oxidation effect in electrochemical oxidation treatment of landfill leachate*. **Water Research**, S.I., v. 29, n. 2, p. 671-678, 1995.

CIDRACK, D. S. **1º Relatório de Acompanhamento e Monitoramento Ambiental - RAMA**. Fortaleza: 2015. 64 p.

CLARO, Elis Marina Turini *et al* . Avaliação (em escala laboratorial) da aplicação do processo eletrolítico em efluente de lagoa de estabilização de esgoto urbano. **Quím. Nova**, São Paulo, v.33, n.3, p.557-561, 2010. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S010040422010000300012&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010040422010000300012&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 08 de Out. de 2019.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. Rio de Janeiro: Abes, 2005.

DI BERNARDO, L. Algas e suas influências na qualidade das águas e nas tecnologias de tratamento. Rio de Janeiro: **ABES**, 1995. 140 p.

ENEL CEARÁ. **Taxas, tarifas e impostos**. Disponível em: [https://www.enel.com.br/pt-ceara/Tarifas\\_Enel.html](https://www.enel.com.br/pt-ceara/Tarifas_Enel.html). Acesso em: 17 mai 2020

FONSECA, G.A.B; 2010 **Contribuição Antrópica na Poluição de Reservatórios Hidrelétricos**: o Caso da Usina Hidrelétrica de São Simão Rio de Janeiro. Dissertação Mestrado em Ciências em planejamento energético UFRJ/COPPE, 2010.

GHERNAOUT, D; NACEUR, M. W; AOUABED, A. On the dependence of chlorine by-products generated species formation of the electrode material and applied charge during electrochemical water treatment. **Desalination**, [s.l.], v. 270, n. 1-3, p.9-22, abr.2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2011.01.010>.

GONDIM, A.L.N. **aprimoramento da tratabilidade da água eutrofizada do Açude Gavião visando à redução na geração de trihalometanos**. 2018. 61 f. TCC (Especialização) - Curso de Química, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/1138/1/AMANDA%20LA%C3%8DS%20DO%20NASCIMENTO%20GONDIM.pdf>. Acesso em: 25 out. 2019.

GOOGLE EARTH-MAPAS. **Localização da Lagoa da Parangaba**. Disponível em: <https://earth.google.com/web/@-3.7704526,-38.56800696,17.71311515a,1052.17827363d,35y,97.36584051h,44.99998852t,-0r/data=Cj0aOB1wCgAZoH5hQ4EoDsAhSRv9HqtIQ8AqGjPCsDQ2JzExLjIiUyAzOMKwMzQnMDMuOCJXGAIgASgC>. Acesso em: 18 nov. 2019.

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. 9. ed. Porto Alegre: Bookmam, 2002.

HOLT, P. K. **Eletrocoagulation: Unravelling and synthesising the mechanisms behind a water treatment process**. Sydney 2003. Tese Doctor of Philosophy in Chemical Engineering Department of Chemical Engineering University of Sydney.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Indicadores por ano – 2017**. São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.painelsaneamento.org.br/>. Acesso em: 05 set. 2019.

JIA, J. B. *et al.* Novel electrochemical heterogeneous catalytic reactor for organic pollutant abatement. **Russ. J. Electrochem.**, v. 43, p. 296-300, 2007.

KOBYA M.; HIZ H., SENTURK E.; AYDINER C.; DEMIRBAS E. Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. **Desalination**, v.190, p. 201– 211, 2006.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas: Átomo, 2010.

LIMA, João Sergio Queiroz de. Estimativa do lançamento de esgoto doméstico por assentamentos precários em lagoas na cidade de Fortaleza, Ceará, Brasil. **REDE - Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 11, n. 2, p. 92-107, abr. 2018. ISSN 1982-5528. Disponível em: <http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/481>. Acesso em: 01 set. 2019.

MAIA, L. G. C. **Estudo do processo de eletrocoagulação/floculação aplicado ao polimento de efluente doméstico**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Área de Concentração: Saneamento Ambiental) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

Malakootian, M.; Mansoorian, H. J.; Moosazadeh, M.; *Desalination* 2010, 255, 67.

MATTESON, Michael J et al. Electrocoagulation and separation of aqueous suspensions of ultrafine particles. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, S.I., v. 104, p. 101-109, 1995.

MOTA, Francisco Suetônio Bastos. **Gestão Ambiental de Recursos Hídricos**. Fortaleza: ABES, 2008b.

NETTO, J.M.A; **Novos conceitos sobre a eutrofização**. DAE , v.48, n.151, p.22 – 28, 1988.

OLIVEIRA, Francisco Diego Araújo; ALMEIDA, Herivanda Gomes de; LIMA, Isabelly Silva; GOMES, Raimundo Bemvindo. **Avaliação do estado de eutrofização de um ecossistema lacustre urbano – Lagoa de Parangaba, Fortaleza-CE**. Disponível em: <http://www.sbpcnet.org.br/livro/62ra/resumos/resumos/5035.htm>.

OTENIO, M.H. *et al.* Avaliação (em escala laboratorial) da aplicação do processo eletrolítico em efluente de lagoa de estabilização de esgoto urbano. **Química Nova**, Vol. 33, No. 3, 557-561, 2010.

PASCHOALATO, C.F.P.R. **Efeito da Pré-Oxidação, Coagulação, Filtração e Pós-Cloração na Formação de Subprodutos Orgânicos Halogenados em Águas Contendo Substâncias Húmicas**. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de doutor em Engenharia Civil área de concentração em Hidráulica e Saneamento. São Carlos – SP. 2005

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.

RIBEIRO, Christian Ricardo; PIZZO, Henrique da Silva. Avaliação da sustentabilidade hídrica de Juiz de Fora/MG (*evaluation of the water sustainability at Juiz de Fora county/Minas Gerais*). **Mercator**, Fortaleza, v. 10, n. 21, p. 171 a 188, apr. 2011. ISSN 1984-2201. Available at: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/467>. Acesso em: 09 set. 2019.

RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. A. **Tratamento de água tecnologia atualizada**. 9. reimpressão. São Paulo: Blücher, 1991.

SALES, M. V. **Tratamento de água eutrofizada através de dupla filtração e oxidação**. 2005. 261 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2005.

SAMPAIO, A. E. **Avaliação econômica comparativa da estação de tratamento de água de Maranguape tratando água de dois distintos mananciais: Açudes Acarape do Meio e Gavião**. 2014. 52 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão de Recursos Hídricos)- Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

SAMPAIO, Victor Cochrane Santiago. **Pré-tratamento de água para abastecimento humano utilizando processo eletrolítico por corrente contínua pulsada**. 2016. 159 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil., Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Disponível em: [http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/21472/2/2016\\_tese\\_vcassampaio.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/21472/2/2016_tese_vcassampaio.pdf). Acesso em: 18 set. 2019.

SAMPAIO, F.I.S.S. **Diagnóstico Sócio - ambiental e da Água de um Ecossistema Lacustre Urbano de Fortaleza – CE: Lagoa de Parangaba**. Monografia (Especialização). Centro Federal de Educação Tecnológica do Ceará. Fortaleza – Ce. 2008. 83p.

SHIN, S.; YOON, H.; JANG, J. Polymer-encapsulated iron oxide nanoparticles as highly efficient Fenton catalysts. **Catalysis Communications**, v. 10, p. 178-182, 2008.

SINOTI, A.L.L.; de SOUZA, M.A.A.; Processo Eletrolítico no Tratamento de Esgotos Sanitários: Estudo da sua Aplicabilidade e Mecanismos Associados. **23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.

TICIANELLI, E. A.; GONZALES, E. R. **Eletroquímica: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo, EDUSP, 2005.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para engenheiros e cientistas**. Rio de Janeiro: LTC, v. 3, 2009.

VERGÍNIA, Fernanda Devaliere. Monitoramento da Estação de Tratamento de Água do Município de Imbituba-SC. 2017. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Química, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2017. Disponível em: <https://riuni.unisul.br/bitstream/handle/12345/2320/completo%20%20tcc.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 20 out. 2019.

VON SPERLING, M. **Introdução a Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 2ª Ed. - Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996, 243p.

WETZEL, R. G. **Limnologia**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1993. 919 p.

WIENDL, W.G. **Processo Eletrolítico no Tratamento de Esgotos Sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 1998, 368p.