



**CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**SABRINA MOURA SENA**

**OZONIZAÇÃO ASSOCIADA A PROCESSOS DE ELETROXIDAÇÃO,  
ELETROFLOTAÇÃO E ELETROCOAGULAÇÃO APLICADOS AO TRATAMENTO  
DE ÁGUAS URBANAS**

**FORTALEZA**

**2023**

SABRINA MOURA SENA

**OZONIZAÇÃO ASSOCIADA A PROCESSOS DE ELETROXIDAÇÃO,  
ELETROFLOTAÇÃO E ELETROCOAGULAÇÃO APLICADOS AO TRATAMENTO  
DE ÁGUAS URBANAS**

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

2023

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)

S474o

Sena, Sabrina Moura.

Ozonização associada a processos de eletroxidação, eletroflotação e eletrocoagulação aplicados ao tratamento de águas urbanas / Sabrina Moura Sena. - 2023.

67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Universitário Christus - Unichristus, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Eliezer Fares Abdala Neto.

1. Reator eletrolítico. 2. Ozonização. 3. Eletrocoagulação. 4. Eletroflotação. 5. Eletroxidação. I. Título.

CDD 624

SABRINA MOURA SENA

**OZONIZAÇÃO ASSOCIADA A PROCESSOS DE ELETROXIDAÇÃO,  
ELETROFLOTAÇÃO E ELETROCOAGULAÇÃO APLICADOS AO TRATAMENTO  
DE ÁGUAS URBANAS**

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<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elayne Valério Carvalho

Centro Universitário Christus (UNICHRISTUS)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Juliana Alencar Firmo de Araújo

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

*Go on and try to tear me down, I will be  
rising from the ground, like a skyscraper.*

*Demi Lovato*

## **Agradecimentos**

Quero agradecer primeiro à Deus, por ter me dado a oportunidade, força, coragem e resiliência para estudar e concluir um curso que eu tanto sonhei.

Em segundo, à minha mãe, que sempre esteve ao meu lado me apoiando e me dando todo o suporte necessário para que eu alcançasse e não desistisse dos meus sonhos. Te amo, mãe!

Ao meu irmão, que sempre me apoiou e me incentivou a não desistir. Essa conquista também é sua.

Ao meu orientador, Prof. Eliezer, que sempre esteve disposto a me ajudar com a pesquisa, sempre confiante no meu trabalho e resultados. Muito obrigada!

Aos meus familiares em geral, que sempre se dispuseram a me ajudar a conquistar esse sonho de alguma forma. Muito obrigada!

Aos meus amigos que conquistei ao longo da vida, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado nesta caminhada.

À minha melhor amiga, que sempre de algum modo me apoiou e me incentivou a chegar aonde eu cheguei. Amo você, bestinha.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar a influência dos eletrodos associados à ozonização, aplicados às tecnologias de eletroflotação, eletrocoagulação e eletroxidação, para o tratamento de águas urbanas, a fim de torná-las potável ampliando a oferta de água. O reator eletrolítico foi composto por oito placas de alumínio, um gerador de ozônio, uma fonte elétrica transformadora de 220V para 13,8V e um reator acrílico circular. Para a realização do tratamento, foram coletadas 9L de água da Lagoa do Mondubim, localizada no bairro Novo Mondubim em Fortaleza-CE. As amostras coletadas foram analisadas em um laboratório, para verificar os parâmetros físico-químico e microbiológica, tanto no seu estado bruto quanto tratado. A duração do experimento foi de 15 minutos. A água tratada apresentou uma redução de 72% no parâmetro de ferro total em relação a água bruta, já a cor aparente da água tratada mostrou um valor de 4 Pt/Co enquanto a água bruta 135,6 Pt/Co, uma queda de 97% após o tratamento. O cloro residual livre, após o tratamento conseguiu permanecer dentro do intervalo de 0,200 a 5,000 mg/L, com um valor de 0,200 mg/L, já o parâmetro da turbidez, no seu estado bruto, apresentou um valor de 24,43 UNT, enquanto seu valor no estado tratado foi de 0,110 UNT, com uma redução de 99,5%. No âmbito da análise com a qualidade físico-química, o reator eletrolítico alcançou as expectativas, onde os parâmetros que estavam fora dos valores de referência, após o tratamento, alcançaram os padrões exigidos. Na qualidade microbiológica, os parâmetros de coliformes totais e *Escherichia coli*, foram eliminados após o tratamento com o reator eletrolítico, permanecendo assim dentro do exigido pela da PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021). Diante disso, o reator eletrolítico com eletrodos associados a ozonização, alcançou os objetivos de tratar a água para torná-la potável, fazendo assim com que esta tecnologia seja uma ótima alternativa viável para o tratamento de água proveniente de lagoas e lagos para o consumo humano.

**Palavras-chave:** Reator eletrolítico. Ozonização. Eletrocoagulação. Eletroflotação. Eletroxidação.

## ABSTRACT

The present work aims to analyze the influence of electrodes associated with ozonation applied to electroflotation, electrocoagulation, and electrooxidation technologies for the treatment of urban waters, to make them potable and expand the water supply. The electrolytic reactor was composed of 8 aluminum plates, an ozone generator, a power source transforming from 220V to 13.8V, and a circular acrylic reactor. For the treatment, 9L of water from Mondubim Lagoon, located in the Novo Mondubim neighborhood in Fortaleza-CE, were collected. The collected samples were analyzed in a laboratory to assess physicochemical and microbiological parameters in both their raw and treated states. The experiment lasted for 15 minutes. The treated water showed a 72% reduction in the total iron parameter compared to raw water, while the apparent color of the treated water showed a value of 4 Pt/Co compared to the raw water's 135.6 Pt/Co, a 97% decrease after treatment. The residual free chlorine, after treatment, remained within the range of 0.200 to 5.000 mg/L, with a value of 0.200 mg/L. The turbidity parameter, in its raw state, had a value of 24.43 UNT, while its value in the treated state was 0.110 UNT, with a 99.5% reduction. In terms of physicochemical quality analysis, the electrolytic reactor met expectations, where parameters that were outside reference values reached the required standards after treatment. In microbiological quality, the parameters of total coliforms and *Escherichia coli* were eliminated after treatment with the electrolytic reactor, thus remaining within the requirements of the GM/MS ORDINANCE N° 888, OF MAY 4, 2021 (Brazil, 2021). Therefore, the electrolytic reactor with electrodes associated with ozonation achieved the objectives of treating water to make it potable, making this technology a viable alternative for the treatment of water from ponds and lakes for human consumption.

**Keywords:** Electrolytic reactor. Ozonization. Electrocoagulation. Electroflotation. Electrooxidation.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1: Delimitação do Semiárido (2021).....  | 18 |
| Figura 2: Modelo esquemático dos processos de coagulação e floculação.....              | 24 |
| Figura 3: Esquema de Decantador do Tipo Horizontal.....                                 | 25 |
| Figura 4: Esquema vertical de um filtro lento.....                                      | 26 |
| Figura 5: Esquema vertical de um filtro rápido.....                                     | 26 |
| Figura 6: Desenho esquemático da filtração direta ascendente.....                       | 28 |
| Figura 7: Desenho esquemático da filtração direta descendente.....                      | 29 |
| Figura 8: Desenho esquemático da dupla filtração.....                                   | 30 |
| Figura 9: Mecanismo geral da eletrocoagulação.....                                      | 31 |
| Figura 10: Esquema simplificado do equipamento gerador de ozônio.....                   | 37 |
| Figura 11: Reações de oxidação de compostos (substratos) na ozonização da água.....     | 39 |
| Figura 12: Fluxograma esquemático onde mostra as etapas da metodologia do estudo.....   | 40 |
| Figura 13: Mapa de localização da lagoa.....  | 41 |
| Figura 14: Esboço do reator eletrolítico associado ao ozônio utilizado na pesquisa..... | 42 |
| Figura 15: Reator Acrílico.....   | 48 |
| Figura 16: Eletrodos e Reator Acrílico.....   | 48 |
| Figura 17: Reator Eletrolítico Montado.....   | 49 |
| Figura 18: Aspectos do experimento.....   | 56 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| Quadro 1: Propriedades Físicas do Ozônio..... | 36 |
|---|----|

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Percentual da composição química do alumínio 1050 utilizado nos experimentos             | 43 |
| Tabela 2: Comparativo dos parâmetros fora do padrão da portaria – água bruta .....                 | 52 |
| Tabela 3: Tabela comparativo parâmetros dentro do padrão da portaria – água bruta.....             | 54 |
| Tabela 4 - Melhor tempo de clarificação em relação ao parâmetro de turbidez.....                   | 55 |
| Tabela 5 - Análise físico-química da água tratada .....  | 56 |
| Tabela 6: Comparativo dos parâmetros que estavam fora do padrão da portaria após o tratamento..... | 58 |
| Tabela 7: Análises microbiológica da água tratada.....   | 59 |

## 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>  | <i>16</i> |
| 1.1.2      | <i>Objetivos específicos.....</i>  | <i>16</i> |
| <b>1.2</b> | <b>Estrutura do trabalho .....</b>   | <b>16</b> |
| <b>2</b>   | <b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>  | <b>17</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Qualidade das águas.....</b>  | <b>18</b> |
| 2.1.1      | <i>Parâmetros físicos.....</i>   | <i>19</i> |
| 2.1.2      | <i>Parâmetros químicos.....</i>  | <i>20</i> |
| 2.1.3      | <i>Parâmetros biológicos.....</i>  | <i>22</i> |
| <b>2.2</b> | <b>Etapas do tratamento de água para consumo humano .....</b>                | <b>22</b> |
| 2.2.1      | <i>Pré-oxidação .....</i>  | <i>22</i> |
| 2.2.2      | <i>Coagulação .....</i>  | <i>23</i> |
| 2.2.3      | <i>Floculação .....</i>  | <i>23</i> |
| 2.2.4      | <i>Decantação .....</i>  | <i>24</i> |
| 2.2.5      | <i>Filtração.....</i>  | <i>25</i> |
| 2.2.6      | <i>Desinfecção.....</i>  | <i>27</i> |
| <b>2.3</b> | <b>Tecnologias de tratamento de água para consumo humano .....</b>           | <b>27</b> |
| 2.3.1      | <i>Filtração direta descendente .....</i>                                    | <i>28</i> |
| 2.3.2      | <i>Dupla filtração.....</i>  | <i>29</i> |
| <b>2.4</b> | <b>Tecnologia não convencional aplicado à desinfecção de águas .....</b>     | <b>30</b> |
| 2.4.1      | <i>Processo eletrolítico .....</i>   | <i>30</i> |
| 2.4.1.1    | <i>Eletrocoagulação.....</i>   | <i>30</i> |
| 2.4.1.2    | <i>Eletroflotação .....</i>  | <i>31</i> |
| 2.4.1.3    | <i>Eletroxidação.....</i>  | <i>32</i> |
| 2.4.2      | <i>Radiação ultravioleta .....</i>   | <i>32</i> |
| 2.4.2.1    | <i>Propriedades .....</i>  | <i>32</i> |
| 2.4.2.2    | <i>Fonte de emissão.....</i>   | <i>33</i> |
| 2.4.2.3    | <i>Intensidade da radiação .....</i>   | <i>34</i> |
| 2.4.2.4    | <i>Mecanismos da radiação ultravioleta .....</i>                             | <i>34</i> |
| 2.4.3      | <i>Ozonização .....</i>  | <i>35</i> |
| 2.4.3.1    | <i>Propriedades .....</i>  | <i>36</i> |
| 2.4.3.2    | <i>Fonte de emissão.....</i>   | <i>37</i> |
| 2.4.3.3    | <i>Mecanismos do ozônio.....</i>   | <i>38</i> |
| <b>3</b>   | <b>METODOLOGIA .....</b>   | <b>40</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Local do experimento .....</b>  | <b>40</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Água do estudo .....</b>  | <b>40</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Sistema experimental.....</b>   | <b>41</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Procedimento experimental.....</b>  | <b>44</b> |
| 3.4.1      | <i>Coleta e preservação das amostras .....</i>                               | <i>44</i> |
| 3.4.2      | <i>Descrição dos experimentos .....</i>                                      | <i>45</i> |
| 3.4.3      | <i>Caracterização físico-química e microbiológica da água estudada .....</i> | <i>45</i> |
| <b>4</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>   | <b>48</b> |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.1 | Concepção, montagem, instalação e operação da célula eletrolítica                                      | 48 |
| 4.2 | Caracterização Físico-química e microbiológica da água bruta   | 49 |
| 4.3 | Resultados da 1ª Etapa do Experimento – melhor tempo de clarificação                                   | 55 |
| 4.4 | Resultados da 2ª etapa do experimento - parâmetros físico-químicos e microbiológicos para água tratada | 56 |
| 5   | CONCLUSÃO  | 60 |
|     | REFERÊNCIAS  | 61 |

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização indevida dos recursos hídricos, a deficiência do sistema de saneamento básico associada ao grande crescimento populacional, têm sido apontadas como principais causas na redução da qualidade dos recursos hídricos (CARTAXO *et al.*, 2020). De acordo com Machado (2011), devido a essas condições, ocorre o crescimento do aporte de carga orgânica com grandes quantidades de nitrogênio e fósforo, gerando florações de organismos fitoplanctônicos (microalgas e cianobactérias) e microrganismos patogênicos em rios, lagos e reservatórios destinados ao abastecimento de água, que podem apresentar potencial produção de toxinas prejudiciais para os seres humanos.

Vários desses contaminantes que surgem são identificados durante o processo de tratamento da água convencional para a potabilização (coagulação, floculação, sedimentação e filtração) que são comumente utilizados na maioria das estações de tratamento de água no Brasil (LIMA *et al.*, 2017).

Diante disso, surge a necessidade de novas tecnologias e etapas para complementar o tratamento de água para garantir a remoção destes contaminantes, assegurando que a água esteja dentro dos padrões de potabilidade da Portaria GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (BRASIL, 2021).

O tratamento por ozonização tem sido uma alternativa bastante utilizada, devido ao seu grande potencial de degenerar os compostos contaminantes, seja parcial ou por completo, que não são degradados nos sistemas biológicos convencionais de tratamento de água (CHAVES *et al.*, 2016).

Chaves *et al.* (2016) fala que “o ozônio é produzido naturalmente na estratosfera pela ação fotoquímica dos raios ultravioleta sobre a molécula de oxigênio”. O gerador de ozônio reproduz essencialmente esse fenômeno natural de forma controlada e eficiente, aliando alta tecnologia na área de materiais com eletrônica avançada. Dessa forma, a produção de ozônio ocorre pelo princípio da descarga elétrica, que acelera os elétrons o suficiente para romper as moléculas de oxigênio (OZENEBRAS, 2014 *apud* CHAVES *et al.*, 2016).

Outras tecnologias também oferecem elevada eficiência, como os métodos eletrolíticos (MARTÍNEZ-HUITLE; BRILLAS, 2009; SALA; GUTIÉRREZ-BOUZÁN, 2012; VIJAYARAGHAVAN *et al.*, 2013), que são processos oxidativos avançados

(ASGHAR et al., 2015; HOLKAR *et al.*, 2016). Essas técnicas se apresentam como alternativas promissoras por serem ecologicamente corretas, economicamente viável e socialmente justas. A principal vantagem relacionada aos processos eletroquímicos é que o resíduo gerado durante a aplicação do processo inerente à célula eletrolítica operando por corrente contínua pulsada, trata-se concentrações razoáveis de gás hidrogênio gerados.

O emprego de processos eletrolíticos envolve a realização de diversos outros processos, tais como a floculação, flotação, oxidação, cloração, precipitação, eletrólise, clarificação, separação iônica, ozonização, desinfecção (MAIA, 2014). Isso torna o método vantajoso em relação a outros processos, nos quais essas etapas ocorrem de forma não simultânea.

Usualmente, na realização deste processo, materiais de origem metálica como o ferro e alumínio são utilizados. E esses metais sofrem o fenômeno da oxidação, formando cátions e em seguida, convertem-se em hidróxidos, que atuam como coagulantes. Este processo é bastante favorável quando aplicado na remoção de impurezas em águas residuais de indústrias têxteis, urbanas, entre outras (NETO *et al.* 2011).

É nesse contexto, com o desenvolvimento de tecnologias associadas aplicadas ao tratamento de águas urbanas, que se caracteriza a presente pesquisa, contribuindo para a geração de alternativas mais eficientes e ecologicamente aceitas, sem a dependência de químicos e com custos reduzidos no aproveitamento de águas urbanas para fins não potáveis.

## 1.1. Objetivos

### 1.1.1. *Objetivo geral*

Analisar a influência da aplicação de eletrodos associados à ozonização na qualidade físico-química e microbiológica de águas urbanas como alternativa para potabilização ampliando a oferta de água.

### 1.1.2. *Objetivos específicos*

- Conceber, montar, instalar e operar o reator com eletrodos aramados promovendo a eletroxidação/eletroflotação/eletrocoagulação associado à aplicação de ozônio, em regime de batelada, tratando águas urbanas para consumo humano;
- Avaliar o uso individual e associado das tecnologias, monitorando resultados das análises físico-químicas e microbiológicas da água de estudo, bruta e tratada;
- Avaliar o uso conjunto das tecnologias (eletroxidação/eletroflotação/eletrocoagulação associado à aplicação de ozônio), monitorando os resultados das análises físico-química e microbiológica da água de estudo, bruta e tratada;
- Inferir a respeito da eficiência alcançada na adequação das características físico-químicas e microbiológicas da água de estudo, seguindo as diretrizes do padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria Nº 888, de 4 de maio de 2021, pelo Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2021);

## 1.2. Estrutura do trabalho

Inicialmente este trabalho conta de introdução apresentada no capítulo um e posteriormente revisão bibliográfica na qual irá abordar os principais componentes envolvidos no sistema de reuso de águas cinzas. No capítulo três constam os materiais e métodos utilizados para realizar a pesquisa, seguida dos resultados no capítulo quatro, onde serão expostos os da pesquisa. Finalizada pela conclusão no capítulo cinco.



## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

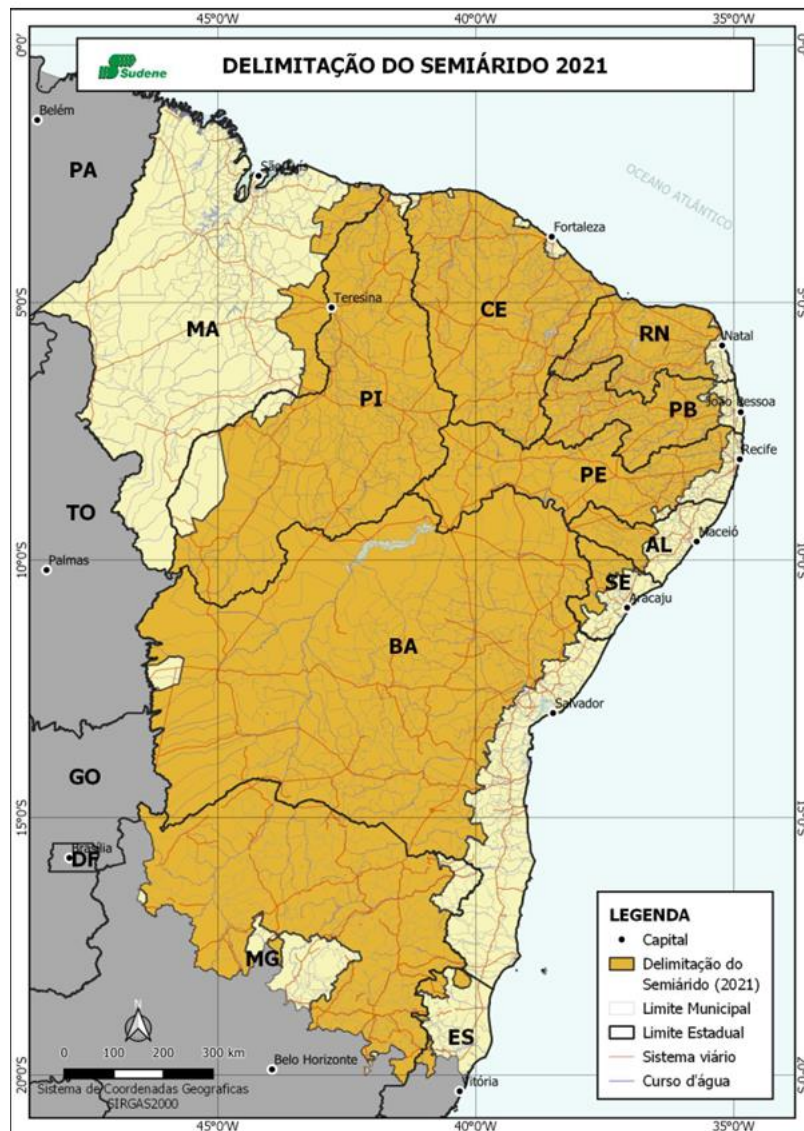
Os autores Zanella (2014) e Marengo *et al* (2011) frisam em suas pesquisas que o Nordeste Brasileiro está historicamente ligado a seca e falta de água, onde estas consequências ocasionadas pela escassez de água mostram-se de diversas formas, seja pela perda de safras, falta de água para a população, falta de saneamento, pobreza ou pela conseqüente migração das águas atingidas, estes efeitos estiveram ligados ao semiárido. O Brasil enfrenta o desafio de debater estratégias para preservar e valorizar os recursos naturais do semiárido, considerando sua fragilidade ambiental e social.

De acordo com o Pacto das Águas (CEARÁ, 2008) e Zanella (2014), a região semiárida do Ceará é caracterizada por períodos prolongados de seca ao longo da história. Essa condição abrange desde a deficiência de chuvas e a deficiência de umidade no solo agrícola até a queda na produção agropecuária, resultando em impactos sociais e econômicos adversos em diversas áreas. Em resumo, trata-se da identificação de áreas afetadas pela seca, considerando suas causas e efeitos, que variam em diferentes níveis de abrangência.

Com índices de variação anual significativamente mais baixos em comparação com outras áreas do Brasil, o Nordeste apresenta níveis que muitas vezes ficam abaixo de 500mm, conforme dados da ANA (2019). Em consonância com as conclusões de Marengo *et al.* (2011), a maior parte da região enfrenta um problema específico de escassez hídrica, o que impõe desafios ao desenvolvimento das atividades agrícolas e agropecuárias locais, repercutindo, por conseguinte, em nível nacional.

Segundo a SUDENE (2017), o Semiárido Brasileiro (SAB) é demarcado pelos estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Paraíba, Pernambuco, Piauí, Rio Grande do Norte e Sergipe, abrangendo também uma região do Sudeste, representada por Minas Gerais. De acordo com o INSA (2011), a maior parte do semiárido está localizada no Norte da região Nordeste, com o período chuvoso ocorrendo de fevereiro a maio. Essa região se destaca pela elevada ocorrência de secas, sendo que o período de estiagem prevalece, em grande parte, entre os meses de agosto e outubro.

Figura 1: Delimitação do Semiárido (2021)



Fonte: Sudene/IBGE (2021)

## 2.1. Qualidade das águas

Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), cerca de 200 pessoas morrem por hora por falta de saneamento básico. De acordo com as estatísticas da OMS, doenças como diarreia, dengue, febre amarela ou até malária, 80% delas são transmitidas através da água em países em desenvolvimento (FORTES, 2019).

Para avaliar a qualidade da água para consumo humano, é necessário seguir o que estabelece a Portaria Nº 888 do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2021). Essa legislação altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS Nº 5,

de 28 de setembro de 2017, e disponibiliza os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

A classificação dos parâmetros e indicadores que tratam da qualidade da água é especificada em físicos, químicos e microbiológicos. Os indicadores que se enquadram no parâmetro físico são ordenados em cor, condutividade elétrica, sabor e odor, sólidos totais, temperatura e turbidez. Já a análise dos parâmetros químicos é feita pelos indicadores de dureza, (pH), matéria orgânica natural (MON), micropoluentes, nutrientes, sais e metais (nitrogênio, ferro, cloretos, cloro, fósforo, potássio etc.). Para obter o exame microbiológico basta identificar a presença de algas e micro-organismos patogênicos na água. Nos próximos itens serão abordados os parâmetros fundamentais para definição da qualidade da água (LIBÂNIO, 2017).

### *2.1.1. Parâmetros físicos*

**Cor:** A água em seu estado puro não possui cor. Em águas superficiais, a cor predominante é marrom-amarelada, devido à matéria orgânica presente proveniente de decomposição vegetal. Se a água estiver avermelhada, o ferro se faz presente, enquanto a alcalinidade e durezas estiverem elevadas, a coloração da água é esverdeada. A depender da origem da cor da água, a coloração pode ser removida por meio de coagulação e filtração, ou por oxidação química (DI BERNARDO, 2005).

**Turbidez:** A turbidez retrata uma propriedade ótica que ocasiona a dispersão e absorção de um determinado feixe de luz que atravessa a água. Acontecem na presença de partículas em suspensão que podem variar de diâmetro até chegar no tamanho coloidal. A natureza destas partículas varia bastante, mas comumente são argila e silte, matéria orgânica, material de origem de descargas de esgoto doméstico e industrial e de galerias de água pluvial, bactérias, algas e outros micro-organismos e até pequenas bolhas de ar. Esta etapa pode ser entendida como um parâmetro indireto de quantidade de sólidos presentes na água, diante disso, é utilizado bastante no controle de água potável, pois a quantidade de sólidos suspensos presentes na água é baixa (SPERLING, 2017).

**Sabor e Odor:** De acordo com Richter (2009), as características de sabor e odores são consideradas em conjunto, pois são intimamente relacionadas e facilmente

confundidas. Admite-se que existam quatro sabores: azedo, doce, amargo e salino. As substâncias inorgânicas conseguem produzir sabor sem odor. A água adquire um sabor salino a partir de 300 mg/L de cloretos e um sabor amargo com teores de sulfato superiores a 400 mg/L. Os responsáveis pelo sabor e odor na água são as substâncias orgânicas, com exceção do sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ). Na maioria das águas de distribuição, o odor a cloro é bastante nítido, pois se deve a compostos formados na ação do cloro na matéria orgânica.

**Condutividade:** Segundo Libânio (2017), a condutividade elétrica é a capacidade da água de conduzir a eletricidade. Para se alcançar a condutividade elétrica, é necessária que na água tenha uma determinada concentração e carga de íons. Esta solução é determinada verificando a diferença de potencial, em volts, entre dois eletrodos submersos na água e a sua corrente elétrica, em amperes. Diante disso, encontra-se a resistência calculada da água.

### 2.1.2. Parâmetros químicos

**Potencial Hidrogeniônico (pH):** A aferição do pH é de grande importância nas fases do tratamento da água como a coagulação, floculação, na desinfecção, no abrandamento da água e no controle da corrosão (HÉLLER, 2010). Richter (2009), fala que, os métodos para a sua determinação baseados em indicadores colorimétricos são simples e rápidos, entretanto, podem sofrer interferência em águas turvas ou que possuam elementos que distorçam os resultados.

**Alcalinidade:** O objetivo da alcalinidade é obter a medição sobre a capacidade da água de anular os ácidos presentes. De acordo com Richter (2009) os principais íons constituintes da alcalinidade são bicarbonato ( $NaHCO_3$ ), carbonato ( $CO_3 - 2$ ) e hidróxido ( $OH^-$ ). Para se medir o grau de alcalinidade presente na água, deve-se titular uma amostra da água com ácido e determinar seu correspondente de hidrogênio. Diante disso, após a concentração de ácido inserida atingir determinado valor de pH, mede-se a alcalinidade presente na água, retida desde o pH inicial até o final (SPERLING, 2009).

**Acidez:** Conforme Richter (2009), as águas superficiais ácidas quase sempre têm sua acidez vinda de esgotos industriais ácidos ou por lixiviação ou infiltração de águas de minas. Para corrigir a acidez, pode ser utilizado cal ou carbonato de sódio (barrilha), pois em determinada quantidade, é possível a neutralização do ácido e provimento da alcalinidade em demasia, quando se faz necessário nos processos de coagulação ou na estabilização do sistema carbonato.

**Dureza:** A principal propriedade da dureza é dificultar a criação de espuma com sabão. De acordo com o Di Bernardo (2017), os sais de cálcio e magnésio reagem sobre os radicais dos ácidos graxos dos sabões formando compostos insolúveis. Para diminuir a dureza, pode-se submeter à água a processos de abrandamento por precipitação ou de desmineralização por troca iônica.

**Cloretos, sulfatos e sólidos totais:** O grupo de sais geralmente dissolvidos na água, como os bicarbonatos, cloretos, sulfatos e outros sais, se concentrados em grande quantidade, podem deixar a água com sabor salino e propriedades laxativas (RICHTER, 2009). De acordo com a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), se houver uma concentração maior que a permitida nos padrões de potabilidade em águas superficiais, isso indicará que água desta região está poluída com esgotos domésticos (RICHTER, 2009). Assim como os cloretos, os sulfatos só conseguem ser retirados da água por meio de troca iônica, eletrodialise, osmose reversa ou destilação.

**Ferro e manganês:** São elementos metálicos encontrados na natureza, após a infiltração da água em solos e rochas, onde acontece a dissolução desses elementos contaminando a água subterrânea. Os problemas que causam no consumidor e a forma de tratamento para remover estas substâncias são bastante parecidas (HÉLLER, 2010). Segundo a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), os teores adotados de ferro e manganês são delimitados, porém estas restrições são apenas por questões estéticas e econômicas, visto que as duas substâncias são importantes para a nutrição humana (RICHTER, 2009). São várias as formas de se remover o ferro e o manganês. A forma mais simples de remoção contém oxidação continuada de clarificação e filtração.

### 2.1.3. Parâmetros biológicos

**Bactérias:** Existe uma grande diversidade de micro-organismos presentes nas águas superficiais e uma boa parte não é prejudicial à saúde humana (SPERLING, 2017). Para se determinar a possibilidade de contaminação fecal, é verificada a contagem de bactérias coliformes – grupo de micro-organismos provenientes do intestino de mamíferos, incluindo, humanos. Sua presença na água indica a possibilidade de organismos patogênicos, e a ausência desse grupo é tida como prova de que a água está livre de patógenos (LIBÂNIO, 2017).

**Algas:** Segundo Richter (2009), algas são plantas que contém clorofila e que, por meio dela, realizam fotossíntese, usualmente unicelulares, porém algumas espécies podem atingir vários metros de comprimento. Durante o dia, as algas produzem oxigênio por meio da fotossíntese, mas quando à noite, por meio da respiração, elas liberam  $CO_2$ , diminuindo o pH e a alcalinidade. A maioria dos corpos d'água possuem algas em abundância, como os lagos e lagoas, grandes rios e até cachoeiras. Em águas correntes, a presença de algas é menor na nascente e crescem à medida que chegam perto da foz. Se estiverem em pequena quantidade, as algas não apresentam incômodo, porém em grande número e determinadas espécies são predominantes, podem apresentar problemas no sistema aquático. O crescimento excessivo das algas pode acarretar sabor e odor nas águas e danos aos filtros (SPERLING, 2017).

## 2.2. Etapas do tratamento de água para consumo humano

### 2.2.1. Pré-oxidação

A etapa da pré-oxidação no tratamento de água é essencial, pois tem como propósito a redução da propagação de atividades microbiológicas patogênicas e a oxidação de matéria orgânica que causam o odor e o gosto na água (MELLO, 2020).

O agente oxidante químico mais utilizado no processo da pré-oxidação é o cloro. Pela sua maior eficiência ao gás cloro e cloraminas, este agente conserva uma maior concentração de oxidação e melhora as etapas de clarificação. Este agente é utilizado também no controle de sabor e odor, por seu poder desinfectante não ser influenciado pelo pH, entre outros fatores (MELLO, 2020).

### 2.2.2. Coagulação

A coagulação consiste em adicionar coagulantes à água para desordenar as partículas suspensas no meio. Esses coloides são carregados negativamente na superfície. A desestabilização ocorre por meio de reações de hidrólise quando coagulantes são adicionados à água e adsorção dessas espécies hidrolisadas à superfície de partículas coloidais. Este processo pode ser dividido em quatro mecanismos principais, dependendo da dosagem do coagulante e das condições físico-químicas da água: compressão da dupla camada elétrica, adsorção e neutralização de carga, adsorção e formação de pontes de momento; que podem atuar individual ou coletivamente. Posteriormente, no processo de floculação, a matéria dissolvida será agregada formando “flocos” para facilitar a remoção destas partículas e matéria dissolvida (KERRY HOWE, 2016).

### 2.2.3. Floculação

O objetivo da floculação é criar partículas, por meio de agrupamento, que podem ser retiradas por processos de divisão de partículas com a sedimentação por gravidade e/ou filtração.

A floculação trabalha em conjunto com a coagulação, pois estas duas etapas são chamadas de clarificação que é responsável por separar as substâncias inorgânicas.

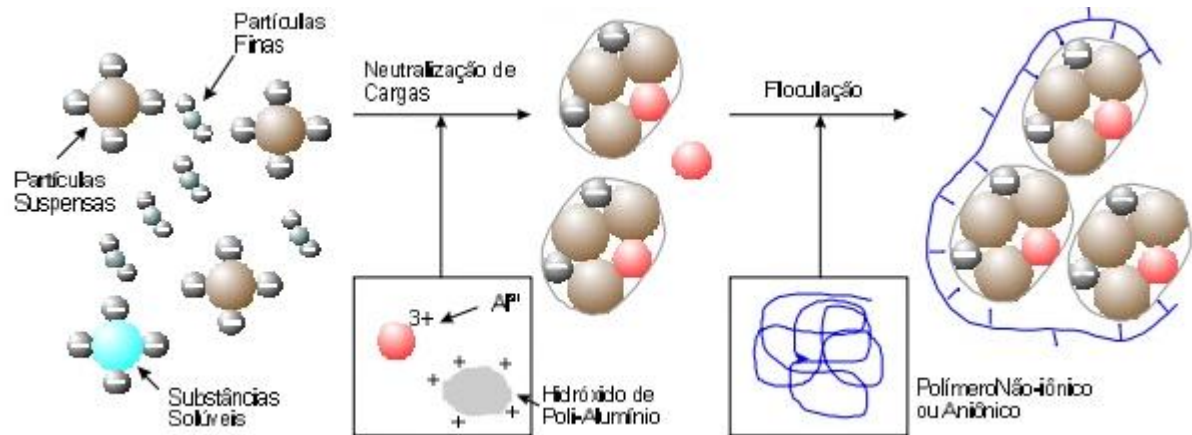
De acordo com Howe (2016), o aspecto barrento é devido às partículas sólidas presentes na água que são chamadas de partículas coloidais que possuem diâmetro de 1nm e 1000nm. Existem partículas com diâmetros maiores como a areia que se concentram no fundo do tanque e são separadas da água por meio da decantação. Mas esse processo não funciona com as partículas coloidais, elas não conseguem se separar por meio da gravidade e com o passar do tempo, acabam se dispersando na água, o que impossibilita a sua retirada (KERRY HOWE, 2016).

Para remover as partículas que ficam dispersas no tanque, a água é retirada e realocada em outro local chamado de floculador, onde são adicionadas na água compostos químicos, os coagulantes.

Diante disso, o processo de coagulação e floculação andam em conjunto, como mostra a Figura 2, pois após a aplicação dos coagulantes na água para provocar

o condicionamento dos coloides, a floculação vai permitir que as matérias e partículas dissolvidas sejam removidas dentro das condições do processo (KERRY HOWE, 2016).

**Figura 2: Modelo esquemático dos processos de coagulação e floculação**



Fonte: Kemira (2003) *apud* Lima (2007).

#### 2.2.4. Decantação

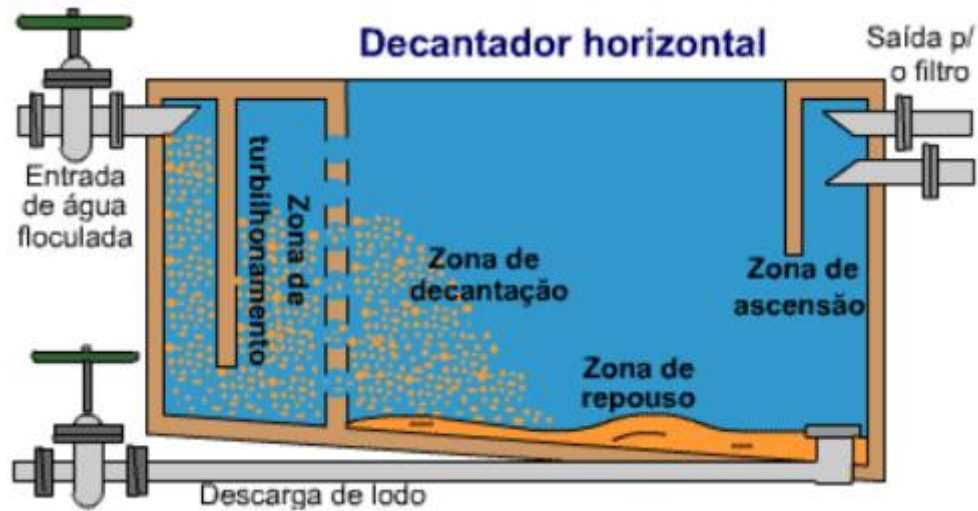
A etapa da decantação consiste na segregação das partículas floculadas, que por estarem agregadas conferem maior massa e assim se dirigem ao fundo do tanque decantador por meio da gravidade.

Usualmente, encontram-se materiais finamente divididos na água, em situação coloidal ou solução, que não são possíveis à retirada por meio de sedimentação simples, tendo que acrescentar os coagulantes para facilitar a criação de flocos que sedimentam com mais facilidade (HELLER, 2010). A



Figura 3 mostra este processo.

Figura 3: Esquema de Decantador do Tipo Horizontal



Fonte: Alexander Aragão (2020).

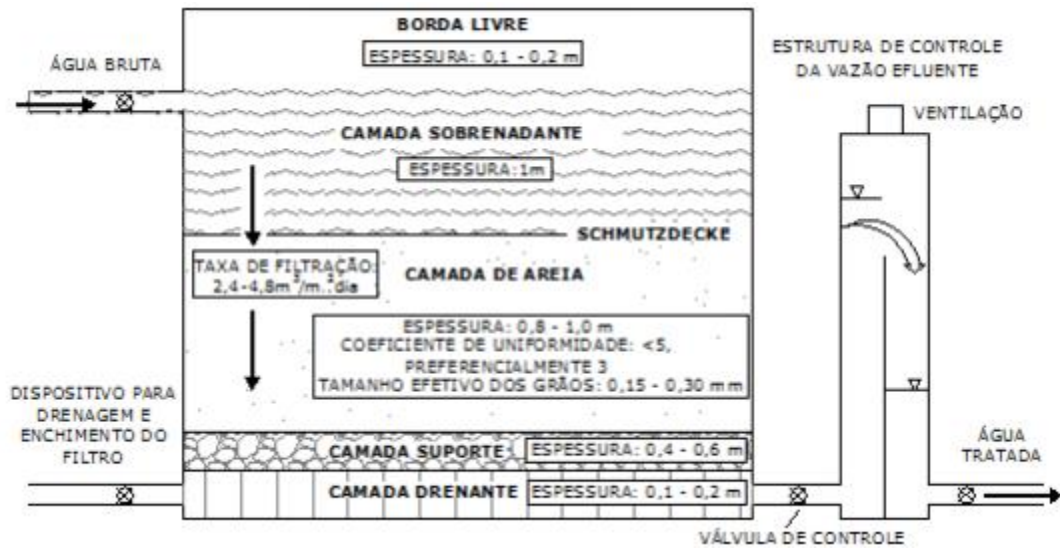
### 2.2.5. Filtração

A filtração é um processo físico-químico e, em determinados casos biológicos para a divisão de impurezas em suspensão na superfície da água, que faz a sua passagem por um meio poroso (RICHTER, 2009).

Os filtros podem ser classificados como lentos e rápidos, a depender da taxa que trabalham e pelo seu grau de limpeza. Os filtros rápidos trabalham com elevadas taxas que chegam a ser 40 vezes maior do que os filtros lentos, geralmente são limpos com contracorrente de água, em uma execução que podem levar alguns minutos. Já os filtros lentos são limpos com uma frequência menor, já que a sua execução dura horas, devido a forma manual de remoção das camadas das camadas superior do leito (HELLER, 2010).

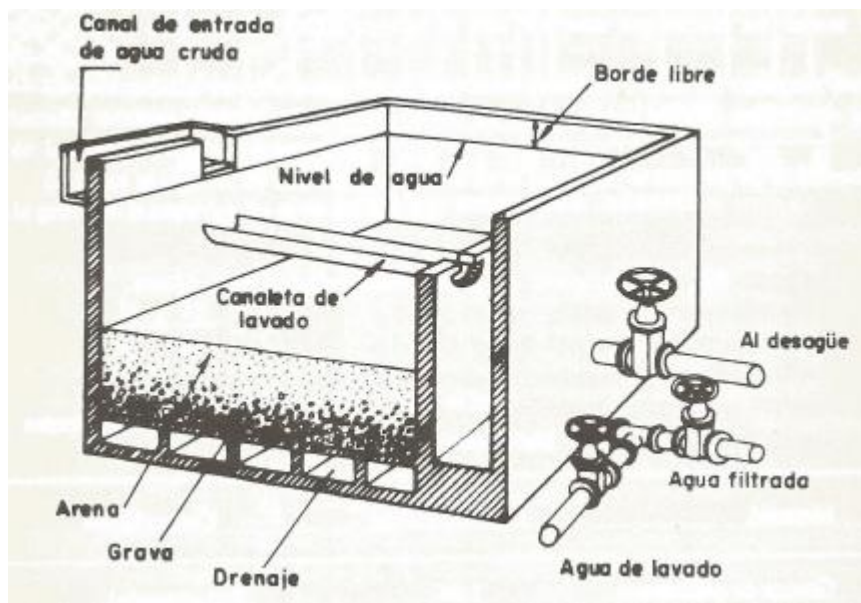
O diâmetro dos grãos e tamanho dos vazios tem grande influência na extração da matéria que está em suspensão pelo filtro e no seu desempenho hidráulico (KERRY HOWE, 2016).

Figura 4: Esquema vertical de um filtro lento



Fonte: Logsdon (2008 modificado).

Figura 5: Esquema vertical de um filtro rápido



Fonte: Arboleda (1973).

### 2.2.6. Desinfecção

No controle de qualidade da água alguns micro-organismos são vantajosos e bastante importantes, principalmente na autopurificação de um corpo d'água. Todavia, determinadas espécies são causadoras de algumas doenças e características que são maléficas à água como febre tifoide, sabor e odor, corrosão em estruturas de concreto e metálico etc (DI BERNARDO, 2005).

A desinfecção tem como objetivo a destruição parcial ou de todo um grupo de micro-organismos patogênicos como bactérias, vermes, vírus e protozoários. O processo de desinfecção é importante, pois não é garantida a retirada total dos micro-organismos pelos processos físico-químicos durante o tratamento de água (SPERLING, 2017).

O sucesso da desinfecção depende apenas da natureza do desinfetante e do tipo de organismo que se tenta inativar. Há chances de alguns organismos serem mais resistentes a inativação, como os esporos e vírus (RICHTER, 2009).

## 2.3. Tecnologias de tratamento de água para consumo humano

A NBR 12216 (ABNT, 1992) diz que para ocorrer de forma adequada, o tratamento de água precisa ser realizado em uma Estação de Tratamento de Água (ETA), sendo ajustado em um conglomerado de características que possibilitam que os padrões de potabilidade sejam atingidos. Entretanto, é essencial ter um domínio das características físicas, químicas e biológicas que comprovam a qualidade da água para que se possa elaborar um projeto de uma (ETA).

Durante o estudo para se determinar a tecnologia mais adequada no tratamento de água, é necessário estar atento a alguns fatores importantes como a qualidade da água bruta, os custos envolvidos, o manuseio e a confiabilidade dos equipamentos e a localização geográfica.

As tecnologias comumente usadas para o tratamento de água para consumo humano são: filtração direta, dupla filtração, filtração lenta, floto-filtração e convencional ciclo completo. Estas tecnologias de tratamento de água para consumo

humano agregam etapas que tem funções bem definidas ao longo do processo (LIBÂNIO, 2017).

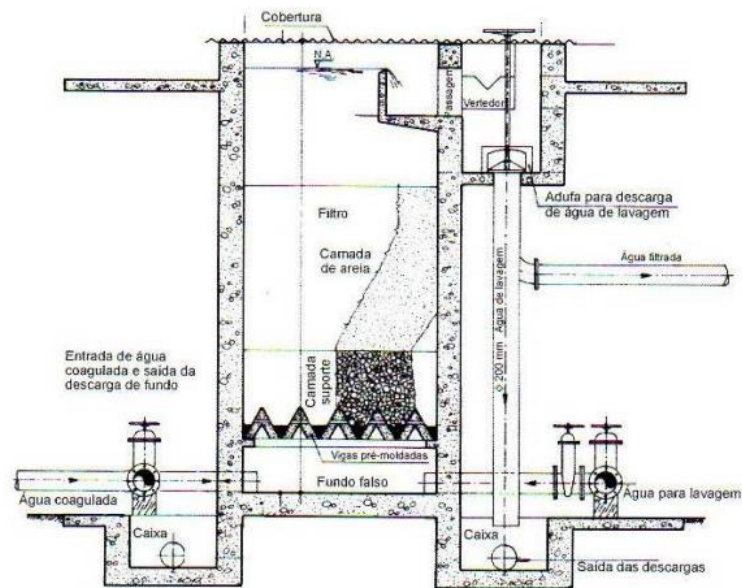
### *2.3.1. Filtração direta descendente*

De acordo com Agnesini (2020), a filtração direta pode variar em função do fluxo de escoamento: filtração direta ascendente, filtração direta descendente e dupla filtração.

Na filtração direta ascendente (FDA) como mostra a Figura 6, o processo do fluxo de filtração acontece no sentido dos grãos de maior densidade, que se localizam na parte inferior do filtro, até os grãos mais finos, que se posicionam na parte superior. No processo de filtração descendente (FDD) apresentada na

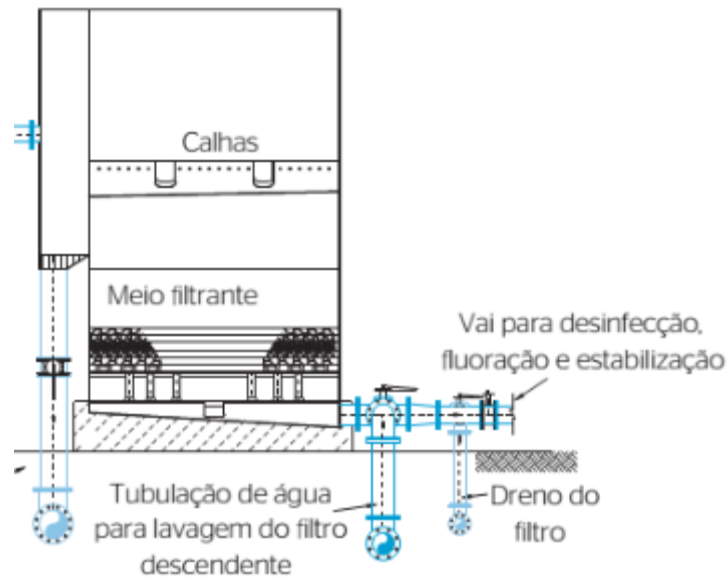
Figura 7, a etapa de filtração é o oposto, visto que, a água flui primeiro no sentido dos grãos finos e depois para os grãos de maiores densidades. Dessa forma, diminui os riscos à saúde da população permitindo que a segurança sanitária da água produzida seja maior (LIMA, 2019).

**Figura 6: Desenho esquemático da filtração direta ascendente**



Fonte: Di Bernardo *et al*, PROSAB (2003).

**Figura 7: Desenho esquemático da filtração direta descendente**



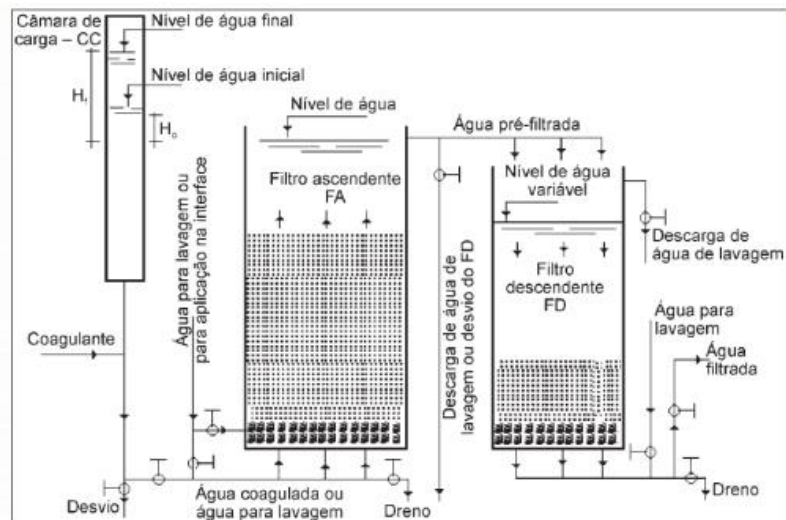
Fonte: Sabogal Paz (2010).

### 2.3.2. Dupla filtração

De acordo com Lima (2019), a dupla filtração (DF) é uma tecnologia que utiliza os dois tipos de filtração, a ascendente e descendente, onde a água passa inicialmente pelo filtro ascendente e em seguida pelo filtro descendente. Durante seu processo no filtro ascendente, a etapa funciona como um pré-tratamento, onde a granulometria é utilizada para gerar uma água com turbidez baixa (BARBALHO, 2020).

De acordo com Barbalho (2020), no Brasil, o desenvolvimento de pesquisas sobre dupla filtração utilizando na primeira etapa do processo a filtração ascendente pedregulhos está em crescimento. Ele continua explicando que esta etapa tem como vantagem um maior volume de acumulação de impurezas, favorecendo uma etapa de floculação na camada inferior do meio filtrante, e promove uma etapa de clarificação semelhante ao do processo de sedimentação.

**Figura 8: Desenho esquemático da dupla filtração**



Fonte: Di Bernado *et al*, (2003).

## 2.4. Tecnologia não convencional aplicado à desinfecção de águas

### 2.4.1. Processo eletrolítico

#### 2.4.1.1. Eletrocoagulação

A eletrocoagulação é um processo aprimorado no tratamento da água que surgiu da coagulação convencional. O desenvolvimento dessa técnica decorre da necessidade de alternativas tecnológicas para o tratamento de águas residuais que sejam economicamente viáveis e apresentem alta eficiência na remoção de poluentes.

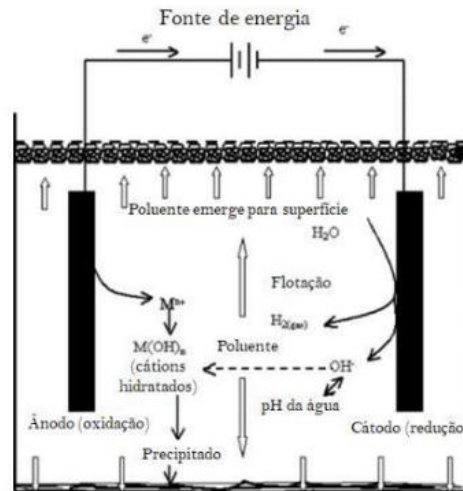
A formação do agente coagulante durante o processo de eletrocoagulação se mostra muito eficaz se alinhado com algumas etapas necessárias:

1. Formação do coagulante por oxidação eletrolítica do eletrodo de sacrifício (ânodo);
2. Enfraquecimento dos poluentes, suspensões de partículas e quebra de emulsões;
3. Agregação das partículas desestabilizadas para formar flocos.

A Figura 9 mostra o mecanismo geral da eletrocoagulação.



**Figura 9: Mecanismo geral da eletrocoagulação**



Fonte: adaptado de Mollah *et al.*, (2004).

#### 2.4.1.2. Eletroflotação

Outra etapa importante do processo eletrolítico é a eletroflotação, que consiste em desestruturar os poluentes que estão dispersos ou emulsificados, em soluções aquosas (AQUINO 2011).

A eletroflotação é um método eletroquímico que tem como objetivo remover poluentes presentes em águas residuais de indústrias urbanas e têxteis. Esse método já foi testado e apresentou resultados satisfatórios. A técnica funciona pela produção de um agente coagulante através da dissolução eletrolítica de ânodos de alumínio, gerando espécies como  $\text{Al}^{3+}$  que, ao serem hidrolisadas, formam o agente coagulante  $\text{Al}(\text{OH})_3$  (MAGALHÃES NETO, 2020).

A eletroflotação vem desempenhando papel importante entre as técnicas não convencionais de tratamento de água e efluentes industriais. E isso se deve a sua versatilidade, e ao tamanho das bolhas que ascendem e por terem tamanhos diminutos (o menor valor encontrado na natureza) conseguem arrastar coloides para a superfície do tanque de flotação (MOLLAH *et al.*, 2000).

Alguns pesquisadores estão investindo em tratamentos envolvendo reatores com eletroflotação na descontaminação de efluentes contendo óleos e graxas (CHEN *et al.*, 2000).

#### 2.4.1.3. Eletroxidação

Da mesma maneira que acontece em qualquer processo eletroquímico, o processo de eletroxidação também há diminuições no cátodo e oxidações no ânodo, tendo como principal objetivo de aplicação o uso das reações redox, que são processos químicos que envolvem troca de elétrons de uma molécula, íons ou átomos para outro reagente, facilitando assim no processo de oxidar impurezas orgânicas e na redução de metais pesados. A oxidação para remover as contaminações orgânicas no ânodo pode acontecer através de dois procedimentos: a oxidação anódica direta e a oxidação indireta (ABDALA NETO, 2021).

Na oxidação anódica direta, acontece uma transferência de carga entre o poluente que se deseja limpar e a superfície do objeto que está sendo usada para limpá-la. Esse processo acontece quando elétrons reagem com as impurezas para que eles sejam oxidados e removidos. Para que essa etapa ocorra, é necessário que os poluentes sejam absorvidos pela superfície do objeto. Em contrapartida, na oxidação indireta, o processo é diferente, pois se dá por meio da geração de espécies que possuem elevado potencial de oxidação na superfície do eletrodo (ABDALA NETO, 2021).

#### 2.4.2. *Radiação ultravioleta*

##### 2.4.2.1. Propriedades

A radiação ultravioleta (UV) pertence ao espectro eletromagnético e apresenta comprimentos de onda mais curtos que os da luz visível e mais longos que os dos raios X, onde é possível distinguir quatro categorias de UV. Essas categorias são classificadas com base em seus comprimentos de onda, sendo a primeira categoria a UV-vácuo com comprimentos de onda entre 100 e 200 nm. Em seguida, a categoria UV-C, com radiação de onda entre 200 e 280 nm, seguida pela UV-A, que

tem radiação de onda longa, com dimensões de cerca de 315 a 400 nm, e, por fim, a categoria UV-B, que apresenta radiação de onda média, entre 280 e 315 nm. A categoria UV-C inclui a faixa de radiação onde ocorre a ação germicida, ou seja, possui a capacidade de inativar microrganismos, realizando assim a desinfecção (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

Conhecida como luz negra, a radiação proveniente da categoria UV-A, de acordo com Tinôco (2011), é amplamente utilizada em câmaras de bronzeamento e fototerapia. Em relação à ação germicida, é considerada insignificante, pois requer extensos períodos de exposição para obter efeitos na desinfecção. A radiação UV-B apresenta a maior capacidade de destruição entre as categorias UV, e está diretamente associada ao desenvolvimento do câncer de pele. Já a radiação UV-vácuo é rapidamente dissipada em meio líquido em curtas distâncias, sendo inviável para o processo de desinfecção de água e esgotos (ALVES, 2021).

#### 2.4.2.2. Fonte de emissão

De acordo com Bastos (2007), a radiação solar é a fonte de radiação principal onde a luz é uma forma de energia que se espalha em todas as direções pelo espaço usando ondas eletromagnéticas, entretanto, antes de chegar à terra, grande parte da radiação produzida é dispersada nas camadas da atmosfera e absorvida pelo ozônio. Contudo, o ser humano por meio de pesquisas avançadas, criou a lâmpada de raios ultravioleta, com extensões de onda especificamente definidas. Tais lâmpadas são capazes de distribuir radiação em todas as direções ao redor do seu eixo.

Estas lâmpadas possuem extremos compostas por eletrodos de tungstênio, contendo uma mistura de terra alcalina que favorece a criação do arco elétrico no interior da lâmpada. Dentro do tubo é adicionada uma pequena quantidade de mercúrio e um gás inerte, geralmente argônio (ALVES, 2021).

#### 2.4.2.3. Intensidade da radiação

A intensidade da radiação emitida não pode ser tratada como imutável, visto que, após a sua irradiação para um material absorvente, parte da radiação é absorvida pela distância percorrida, resultando em um decréscimo na intensidade da radiação em proporção à espessura do material absorvente. Esse processo de absorção pode ser quantificado através da Lei de Beer-Lambert, como expresso na Equação (1).

$$\frac{I}{I_0} = e^{-a.c.L} \quad (1)$$

#### 2.4.2.4. Mecanismos da radiação ultravioleta

Billota e Daniel (2012) apresentam estudos em que as lâmpadas germicidas são utilizadas em conjunto na aplicação de desinfetantes químicos como o ozônio, entre outros, no monitoramento de indicadores microbiológicos, assim como no tratamento de água de abastecimento como nas águas residuárias. Sistemas com mais de um agente desinfetante junto com a radiação ultravioleta são primariamente adequados para a inativação de microrganismos mais resistentes a uma única etapa de desinfecção, como o protozoário *Cryptosporidium*. A eficácia da combinação de agentes desinfetantes está ligada ao efeito sinérgico provocado na primeira etapa da desinfecção, cuja ação visa a melhora dos resultados da segunda etapa da desinfecção, favorecendo a aumento da inativação (LOTIERZO *et al.*, 2003; WANG *et al.*, 2006; BILOTTA e DANIEL, 2007, 2010).

A causa do efeito germicida das lâmpadas ultravioletas, é por efeito da energia associada ao comprimento de onda 254 nm (472,3 kJ.mol<sup>-1</sup>), encarregado de desencadear mudanças no DNA e RNA nas células afetadas. Os danos subsequentes das alterações no RNA são menores, já que o RNA é encontrado dentro da célula na forma de RNA mensageiro, transportador e ribossômico, proporcionando sua divisão (Bitton, 1994; WEF, 1996). Já a unidade do DNA dentro da célula faz com que seja alvo de danificações geralmente irreversíveis, ocasionadas essencialmente pelo controle da intensidade emitida pela luz de bases nitrogenadas, onde elas podem criar organismos sem energia e sem capacidade de propagação e sobrevivência,

amplificando a eficiência da inativação de patógenos, tanto no tratamento de água de abastecimento quanto no esgoto doméstico (WEF, 1996; USEPA, 1999).

### 2.4.3. Ozonização

O ozônio é uma molécula alotrópica do oxigênio que apresenta elevada energia potencial. Esse composto é um gás instável, com coloração azul e alta solubilidade em água, possuindo notável capacidade oxidante. Em relação ao cloro, sua eficiência é vinte vezes superior e a velocidade de ação 3.120 vezes maior, o que o torna letal para bactérias e microrganismos. Além disso, sua solubilidade em meio aquoso é cem vezes maior. No entanto, devido à instabilidade em condições ambientais, não é possível armazenar e transportar o ozônio, sendo necessária a sua geração no local de uso. É importante ressaltar que o ozônio é um gás tóxico e sua concentração no ar não deve ultrapassar 1ppm em volume. Na superfície terrestre, em condições de atmosfera não poluída, é possível detectar concentrações de 0,2ppm a 0,3ppm (NETTO e RICHTER, 1991; BRAGA *et al.*, 2007)

A desagregação de contaminantes através da utilização do ozônio tem sido bastante aproveitado, ainda mais sendo um poderoso gás que elimina os microrganismos da água (MACHULEK JUNIOR, 2022).

Um aspecto limitante levantado em muitos estudos é que o ozônio dispõe forte oxidação, mas baixa execução de mineralização, uma vez que durante o procedimento os compostos orgânicos originais são quebrados em ácidos carboxílicos de cadeia curta, mas não totalmente em água e dióxido de carbono (MACHULEK JUNIOR, 2022).

Diante disso, prontamente são desenvolvidos subprodutos que se encaminham a serem mais biodegradáveis e polares comparados com os seus compostos originais. Uma técnica adotada é a junção de semicondutores ( $TiO_2$ ,  $ZnO$  etc) e agentes oxidantes, como peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) na ozonização, aumentando a velocidade da decomposição do ozônio e expandindo a geração dos radicais hidroxila não seletivos (MACHULEK JUNIOR, 2022).

### 2.4.3.1. Propriedades

De acordo com Martins (2021), o ozônio ( $O_3$ ) é um gás instável, possui alto grau de energia, tem como cor característica o azul e um odor próprio. Sua densidade é 1,5 vezes maior que o oxigênio ( $O_2$ ), 1,7 vezes mais denso que o ar e 14 a 20 vezes mais solúvel em água que o  $O_2$  (SOARES, 2007). O Quadro 1 apresenta um breve resumo das propriedades físicas da molécula do ozônio.

**Quadro 1: Propriedades físicas do ozônio**

|                                     |                         |
|-------------------------------------|-------------------------|
| Peso Molecular                      | 48                      |
| Ponto de Ebulição a 1 atm           | - 111.9°C               |
| Ponto de Efusão                     | - 192.5°C               |
| Densidade a 0°C e 1 atm             | 2.154 kg/m <sup>3</sup> |
| Temperatura Crítica                 | - 12.1°C                |
| Pressão Crítica                     | 5.460 kPa (abs)         |
| Densidade Crítica                   | 540 kg/m <sup>3</sup>   |
| Solubilidade em água, vol,vol a 0°C | 0.64                    |

Fonte: Rakness, 2005 (adaptado do autor)

Em virtude de sua característica eletrofilica, o ozônio possui maior reatividade em superfícies carregadas negativamente do que em superfícies com cargas positivas ou nulas, conforme Jung e Choi (2006). O  $O_3$  é também um potente agente oxidante utilizado na degradação de compostos orgânicos, onde sua realização é gerada *in loco* devido à sua instabilidade, o que ocasiona uma degradação em oxigênio bastante rápida após a sua produção (LAPOLLI *et al.*, 2003).

O ozônio pode ser gerado a partir do ar, do  $O_2$  e da água altamente pura, utilizando diferentes técnicas. Dentre os métodos, o mais utilizado é a descarga corona, que consiste na aplicação de uma voltagem elétrica alternada entre dois eletrodos desassociados por um fluxo de oxigênio puro ou ar que fornece energia suficiente aos elétrons para que estes rompam as duplas ligações da molécula de  $O_2$ , criando dois átomos de oxigênio que reagem com outra molécula de  $O_2$  para formar as moléculas de  $O_3$ , de acordo com as seguintes reações (SILVA, 2008).



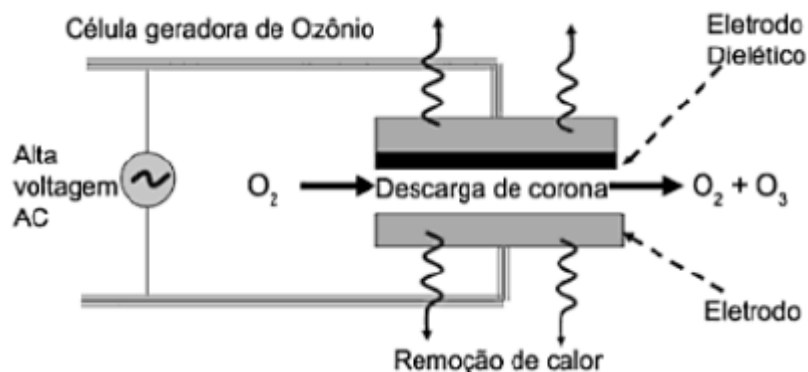
Onde ocorre as reações de degradação de compostos orgânicos poluentes, o ozônio geralmente reage de preferência com os compostos insaturados, como alquenos, alquinos e anéis aromáticos, e é um reagente clássico utilizado para quebrar ligações duplas C=C (PEIXOTO, 2008).

É possível acontecer a deterioração dos compostos orgânicos através do ozônio pelo modo de reação direta ou indireta.

#### 2.4.3.2. Fonte de emissão

Na natureza, o ozônio gasógeno acontece através de reações fotoquímicas na estratosfera terrestre. Para se produzir o ozônio artificialmente, existem vários métodos utilizados, dentre eles está a técnica intitulada de descarga corona (BILOTTA, 2000). A Figura 10 mostra a esquematização do princípio de conversão do  $O_2$  em  $O_3$ .

**Figura 10: Esquema simplificado do equipamento gerador de ozônio.**



Fonte: Dezotti *et al* (2008).

Como mostra Figura 10, a produção do gás é realizada através da passagem de oxigênio entre dois eletrodos, onde é introduzida uma alta tensão que varia entre 8 e 20kV. A geração da descarga corona ao longo dos eletrodos é formada de elétrons com energia capaz de favorecer a divisão das moléculas de oxigênio em seus átomos formadores, como indica a equação 04 (MAUSTELLER 1989), (GLAZE 1987):



Magara, Itoh e Morioka (1995) destacam que a temperatura dos eletrodos deve permanecer baixa para assegurar uma maior geração de ozônio, visto que, se a temperatura não estiver adequada, o ozônio pode ser degenerado instantaneamente e transformado em oxigênio dentro do gerador. Além do mais, o desempenho desta execução varia de acordo com o gás consumido no sistema de alimentação, dado que as concentrações do ozônio são capazes de variar em 1% a 3% em peso para aquele desenvolvimento em função do ar e por volta de 8% a 12% de ozônio em peso para produção onde é empregado o oxigênio puro (METCALF & EDDY; 2014).

#### 2.4.3.3. Mecanismos do ozônio

Segundo Daniel (2001), o ozônio é um poderoso oxidante, com capacidade de oxidar compostos orgânicos e inorgânicos na água, onde desempenharão uma demanda do oxidante antes de acontecer a desinfecção. Na etapa de contato com a água, o ozônio é introduzido na corrente de água a ser tratada. A eficiência da inativação e transmissão depende de vários fatores, incluindo concentração de ozônio, tempo de contato e características da água.

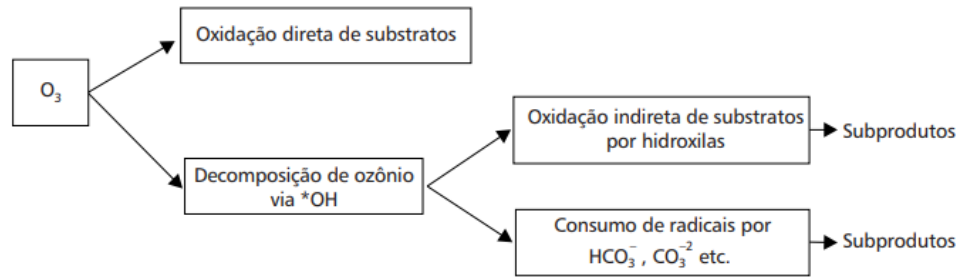
A transmissão direta ocorre quando o ozônio reage diretamente com substâncias orgânicas e inorgânicas presentes na água, gerada na quebra de ligações químicas e na inativação de micro-organismos. A formação de radicais livres acontece quando o ozônio se decompõe em radicais hidroxila (OH) altamente reativos, que reagem com contaminantes na água, oxidando-os e inativando micro-organismos (DANIEL, 2001).

A Figura 11 mostra que dois mecanismos de reação do ozônio podem ocorrer na água:

- Oxidação direta dos compostos pelo ozônio molecular;
- Oxidação dos compostos pelos radicais livres hidroxilas produzidas durante a decomposição do ozônio.



Figura 11: Reações de oxidação de compostos (substratos) na ozonização da água



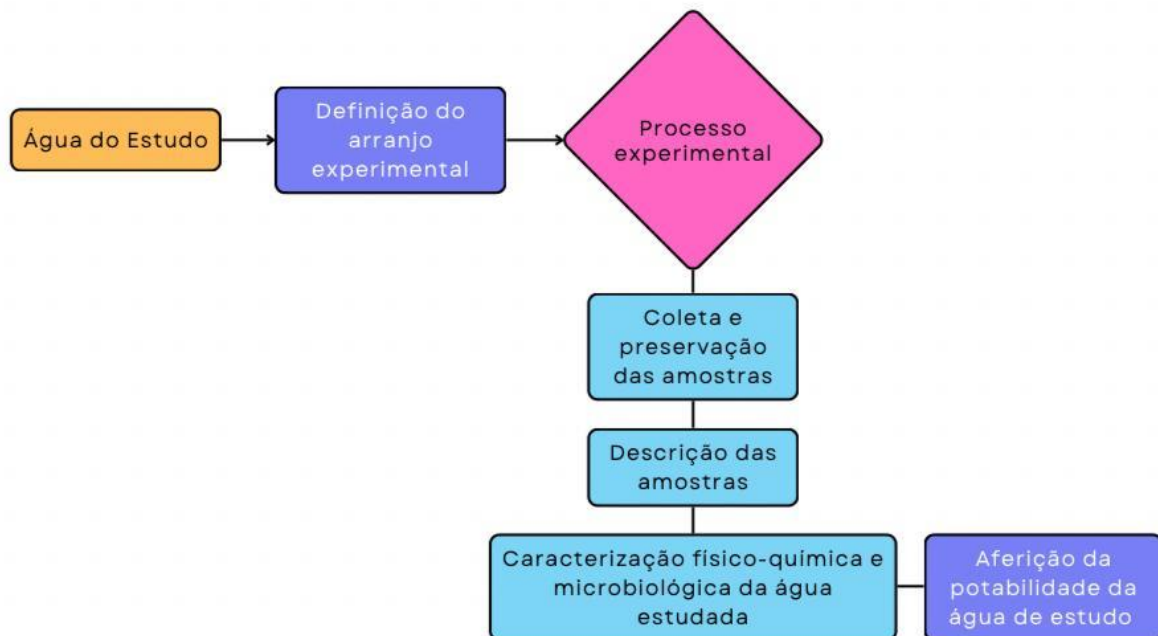
Fonte: Luiz Antonio (2001).

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Local do experimento

O experimento foi realizado no Laboratório de Hidráulica do Núcleo de Práticas Tecnológicas – NPT pertencente ao Centro Universitário Christus – Unichristus, localizado na Rua Pereira Valente, 757, Bairro Meireles, no município de Fortaleza – CE. A Figura 12 apresenta um fluxograma com todas as etapas realizadas para alcançar os resultados deste trabalho.

**Figura 12: Fluxograma esquemático onde mostra as etapas da metodologia do estudo**

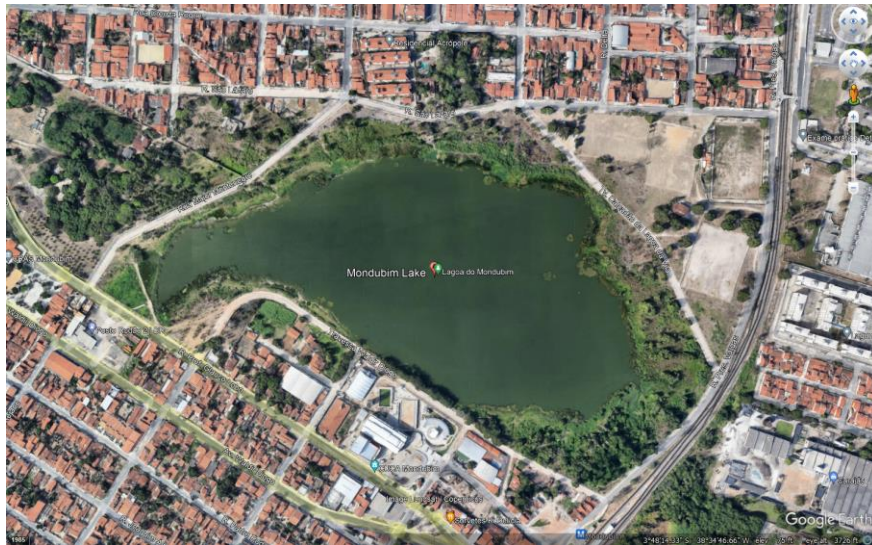


Fonte: Autor (2023).

#### 3.2. Água do estudo

A água do estudo foi proveniente da lagoa do Mondubim, onde está localizada no bairro Novo Mondubim – Fortaleza – Ceará com as seguintes coordenadas 3°48'14.33" S 38°34'46.66" W e área de 257.967,07m<sup>2</sup>.

**Figura 13: Mapa de localização da lagoa**



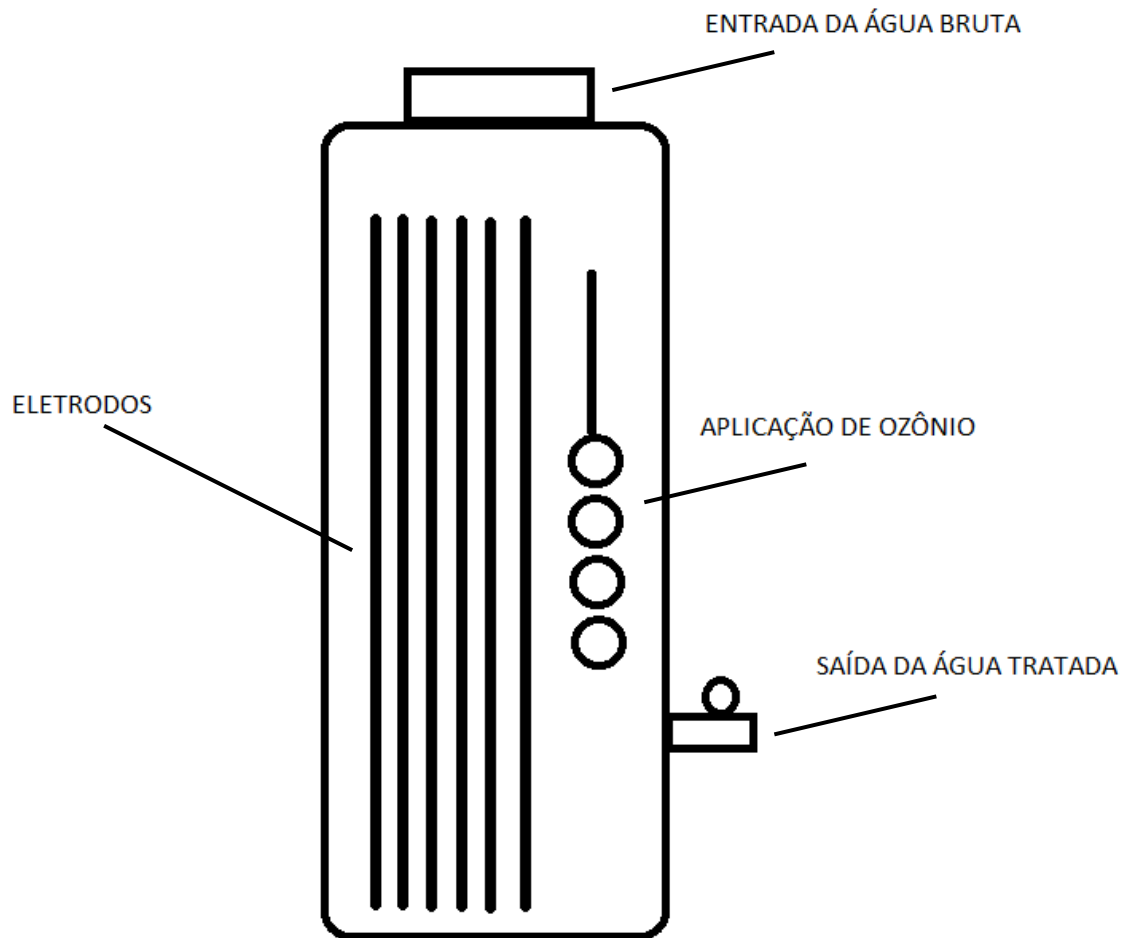
Fonte: Google Earth (2023)

### **3.3. Sistema experimental**

O arranjo experimental formado por um reator eletrolítico composto por um conjunto de eletrodos metálicos de alumínio, um circuito elétrico gerador de sinais elétricos de pulsados e um multímetro digital.

O reator eletrolítico, conforme detalhado na Figura 14, construído em 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>. O material plástico e o formato aplicados ao reator, foram escolhidos por possibilitar um melhor acompanhamento dos processos envolvidos.

Figura 14: Esboço do reator eletrolítico associado ao ozônio utilizado na pesquisa



Fonte: Autora (2023).

A alimentação elétrica foi obtida com o uso de uma fonte transformadora de tensão de 220V para 12 V.

O reator foi operado em batelada e a coleta das alíquotas de efluente tratado foi realizada na torneira localizada na parte mediana do reator.

Os conjuntos de eletrodos utilizados foram compostos por duas placas de alumínio 1050, conectadas por um arranjo bipolar em série, cada uma medindo 05x40x0,3 cm, resultando numa área superficial total de 800 cm<sup>2</sup>. A composição do eletrodo está apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1: 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).

A potência consumida pelo reator 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 uma 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).

Desta forma, buscaram-se alcançar o princípio da superposição, quando duas ou mais ondas ocupam determinado espaço ao mesmo tempo, os deslocamentos causados por cada uma 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; SERWAY *et al.* 2011; TIPLER; MOSCA, 2009).

Segundo Abdala Neto (2012), isto se caracteriza como um fenômeno de ressonância e ocorre quando a frequência de vibração forçada de uma determinada matéria se iguala à frequência natural desta. Este efeito só é 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 pode apresentar muitas vantagens em comparação com a eletrólise por corrente contínua, pois, além de seguir os aspectos inerentes do campo uniforme, o mesmo poderá ser favorecido de acordo com a frequência dos pulsos aplicada, através do fenômeno de ressonância, avaliando a possibilidade de romper ligações moleculares mais facilmente e em um tempo menor e ainda, diminuir 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, de modo a exercer um torque nas 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**

#### *3.4.1. Coleta e preservação das amostras*

Para a realização dos ensaios com o uso do reator eletrolítico associado a ozonização, foi coletada água da Lagoa do Mondubim, no Município de Fortaleza - Ceará.

Na 1ª etapa de experimentos foram utilizados 3L dos 9L coletados na referida Lagoa para definir o melhor tempo de detenção hidráulico, em que ocorrerá a clarificação da água de estudo, com base no melhor resultado do parâmetro turbidez. Para isso, foram realizados experimentos por 15 minutos de operação do reator, com coletas de amostras a cada 3 minutos, analisando resultados de bancada para Condutividade, pH e Turbidez.

Para a 2ª etapa de experimento, utilizou-se o melhor tempo associado ao menor valor de turbidez encontrado na 1ª etapa. Realizou-se novo ensaio tendo a coleta realizada no tempo observado na 1ª etapa, preservada e levada a um laboratório externo para caracterização físico-química e microbiológica da água de estudo tratada pelo reator.

Em ambos os casos, as amostras de água de estudo tanto bruta como tratada, foram preservadas de acordo com a Agência Nacional das Águas e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo através do Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (ANA, 2011; CETESB, 2011).

#### *3.4.2. Descrição dos experimentos*

No reator para execução dos experimentos em batelada, os eletrodos foram inseridos no cilindro acrílico e depois foram adicionados 3L de água de maneira que os eletrodos ficassem submersos na água bruta, bem como os injetores de gás ozônio.

Em seguida, eram checadas as ligações e acionado o cronômetro e o interruptor que fechava o circuito dando início a experimentação.

Os experimentos foram realizados por 15 minutos, e a cada 3 minutos foram retiradas alíquotas de 60 mL de água submetida ao tratamento eletrolítico, as quais eram armazenadas em tubos de falcon para a realização das análises físico-químicas e exames microbiológicos. 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).

#### *3.4.3. Caracterização físico-química e microbiológica da água estudada*

As análises físico-químicas das amostras de água bruta e tratadas pelo processo eletrolítico associado ao gás ozônio, visando a desinfecção, foram realizadas no Laboratório de Hidráulica do Núcleo de Práticas Tecnológicas – NPT.

As análises foram realizadas em duplicata e os parâmetros físico-químicos e microbiológicos 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 e os flocos contidos sofriam o processo de sedimentação, até alcançar uma visível separação em duas fases. O período de 1 hora de repouso foi considerado como padrão para a leitura da turbidez do

sobrenadante das alíquotas, a qual foi realizada a partir do método nefelométrico em um turbidímetro portátil da Hach® 2100P™.

Os parâmetros físico-químicos e os exames microbiológicos avaliados, que serviram de base para aferir a efetividade do processo na desinfecção da água de estudo, seguiram as diretrizes dos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria 888/2021 do Ministério da saúde do Brasil (BRASIL, 2021).

Foram monitorados parâmetros diretamente nos instrumentos de medida escritos seguiram seus respectivos métodos analíticos e referências.

**Quadro 2: Análises físico-químicas realizadas em bancada**

| <b>Parâmetro</b>                                | <b>Metodologia</b>   |
|---|--|
| Turbidez  | Valores medidos com turbidímetro de bancada, fabricado pela Hach Company, modelo 2100P. 87   |
| TDS Teor de Sólidos Dissolvidos e Condutividade | Valores medidos com equipamento portátil, fabricado pela NEW TDSeEC meter, modelo A  |
| pH  | Valores medidos através de potenciômetro fabricado pela Analion, modelo PM 608 e eletrodo combinado fabricado pela Analyser, modelo 2A13-FL. |

**Quadro 3: Análises físico-químicas realizadas em laboratório externo**

| <b>Parâmetro</b>              | <b>Metodologia</b>                    |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| pH à 25°C                     | SMWW 4500 - B - Eletrometric Method   |
| Alcalinidade de Bicarbonatos  | SMWW, 22ª Edição, Método 2320B        |
| Alcalinidade de Carbonatos    | SMWW, 22ª Edição, Método 2320B        |
| Alcalinidade de Fenolftaleína | SMWW, 22ª Edição, Método 2320B        |
| Alcalinidade de Hidróxido     | SMWW, 22ª Edição, Método 2320B        |
| Alcalinidade Total            | SMWW, 22ª Edição, Método 2320B        |
| Amônia                        | SMWW, 22ª Edição, Método 4500 NH3 - H |



| <b>Parâmetro</b>           | <b>Metodologia</b>   |
|----------------------------|--|
| Cálcio                     | SMWW, 22ª Edição, Método 2340C Cálcio e Magnésio             |
| Cloretos                   | SMWW 4500CI - B - Argentometric Method                       |
| Cloro residual livre       | SMWW 22º4500CI-G - Chlorine Teste- DPF<br>Clorimetric Method |
| Condutividade              | SMWW, 22ª Edição, Método 2510B                               |
| Cor aparente               | SMWW, 22ª Edição, Método 2120B                               |
| Dureza total               | SMWW, 22ª Edição, Método 2340C                               |
| Ferro total                | SMWW, 22ª Edição, Método 3500-Fe                             |
| Gosto (Intensidade)        | SMWW, 22ª Edição, Método 2170B                               |
| Magnésio                   | SMWW, 22ª Edição, Método 2340C Cálcio e Magnésio             |
| Nitratos                   | SMWW, 22ª Edição, Método 4500 NO3 - D                        |
| Nitritos                   | SMWW, 22ª Edição, Método 4500 NO2 - B                        |
| Odor (Intensidade)         | SMWW, 22ª Edição, Método 2150B                               |
| Potássio                   | SMWW, 22ª Edição, Método 3111D                               |
| Sódio                      | SMWW, 22ª Edição, Método 3111D                               |
| Sólidos dissolvidos totais | SMWW, 22ª Edição, Método 2540C                               |
| Sulfato                    | Smww, 22ª Edição, Método 4500 O42 - E                        |
| Turbidez                   | SMWW, 22ª Edição, Método 2130B.                              |

**Quadro 4: Análises microbiológicas realizadas em laboratório externo**

| <b>Parâmetro</b>  | <b>Metodologia</b>                    |
|-------------------|---------------------------------------|
| Coliformes totais | SMWW 9222 - C - Enzyme Substrate Test |
| Escherichia coli  | SMWW, 22ª Edição, Método 9223 A e B.  |

**Quadro 5: Atributos Elétricos**

| <b>Parâmetro</b>           | <b>Metodologia</b>  |
|----------------------------|---|
| 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 DC e AC e corrente DC. |

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Concepção, montagem, instalação e operação da célula eletrolítica

Conforme a Figura 15, observa-se a concepção dada ao reator, onde se escolheu a forma cilíndrica que se adequa melhor às observações do ambiente interno do reator, possibilitando aferir início de funcionamento e a evolução da clarificação obtida.

**Figura 15: Reator Acrílico**



Fonte: Autora (2023).

Após a escolha do formato geométrico, procedeu-se a montagem do reator acrílico, com os eletrodos conectados aos fios que vem do circuito gerador de sinais elétricos, conforme Figura 16.

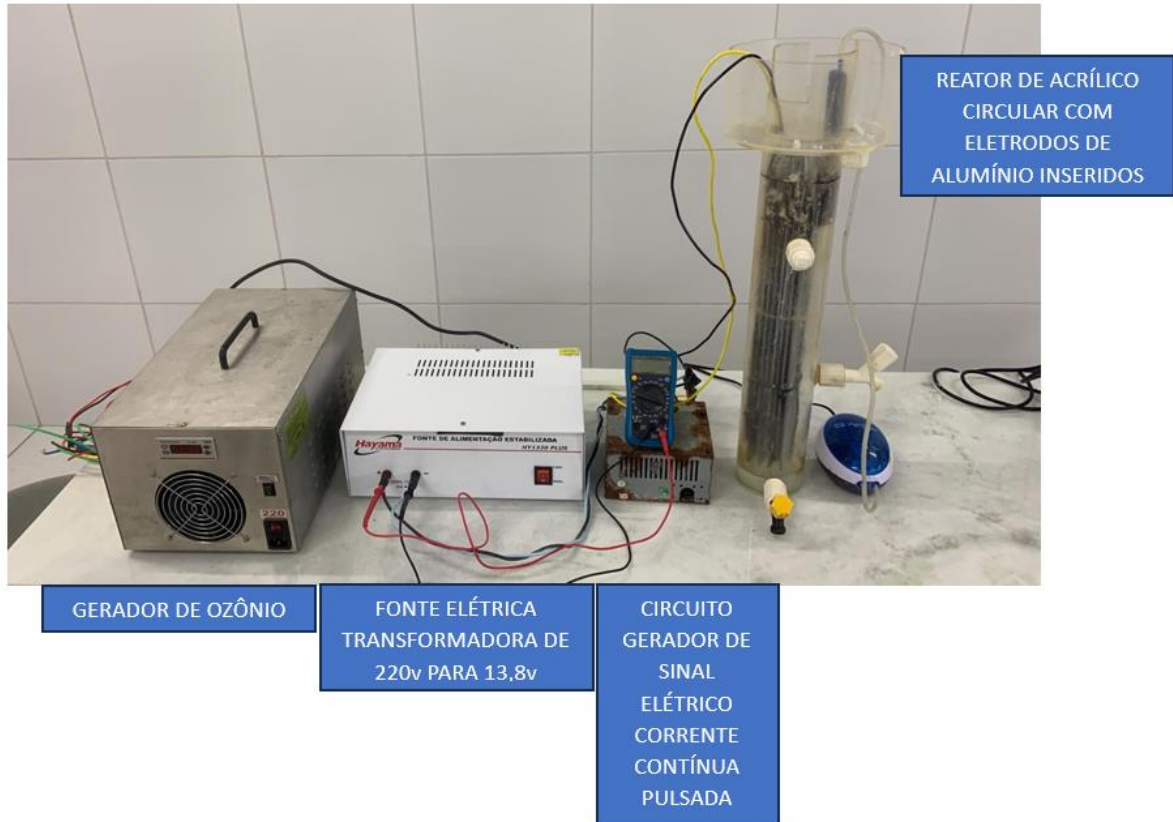
**Figura 16: Eletrodos e Reator Acrílico**



Fonte: Autora (2023).

A finalização da montagem está apresentada na Figura 17 e contou com a instalação dos outros equipamentos que foram necessários para que o reator ficasse completo e apto para os experimentos de tratamento das águas.

**Figura 17: Reator Eletrolítico Montado**



Fonte: Autor (2023)

#### **4.2. Caracterização Físico-química e microbiológica da água bruta**

A coleta da água de estudo foi realizada pelo autor do trabalho no dia 17 de outubro do ano de 2023 às 12 horas e 48 minutos, onde a amostra da água bruta foi submetida a uma análise físico-química e microbiológica no mesmo dia da coleta em laboratório externo a instituição. Os resultados das análises físico-química estão presentes no Quadro 6, com os parâmetros e metodologias utilizados pelo laboratório responsável pela análise bem como os valores de referência máximo exigidos pela PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021).

Quadro 6: Análise físico-química da amostra da água bruta

| Parâmetros                       | Resultados | VMP-PORT.<br>GM/MS<br>N°888 | Unidade                      | Metodologia  |
|----------------------------------|------------|-----------------------------|------------------------------|--|
| pH à 25°C                        | 8,500      | de 6,000 a<br>9,000         | U pH                         | SMWW 4500 -<br>B -<br>Eletrometric<br>Method<br>SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,                     |
| Alcalinidade de<br>Bicarbonatos  | 158,600    | NE                          | mg/L                         | Método 2320B<br>SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,   |
| Alcalinidade de<br>Carbonatos    | <2,000     | NE                          | mg/L em<br>CaCO <sub>3</sub> | Método 2320B<br>SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,   |
| Alcalinidade de<br>Fenolftaleína | <2,000     | NE                          | mg/L                         | Método 2320B<br>SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,   |
| Alcalinidade de<br>Hidróxido     | <2,000     | NE                          | mg/L                         | Método 2320B<br>SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,   |
| Alcalinidade Total               | 130,000    | NE                          | mg/L                         | Método 2320B<br>SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,   |
| Amônia                           | 0,544      | até 1,200                   | mg/L NH <sub>3</sub>         | Método 4500<br>NH <sub>3</sub> - H<br>SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,                               |
| Cálcio                           | 21,600     | NE                          | mg/L Ca                      | Método 2340C<br>Cálcio e<br>Magnésio<br>SMWW   |
| Cloretos                         | 235,926    | até 250,000                 | mgCl <sup>-</sup> /L         | 4500Cl - B -<br>Argentometric<br>Method<br>SMWW  |
| Cloro Residual Livre             | <0,100     | de 0,200 a<br>5,000         | mg/L                         | 22°4500Cl-G -<br>Chlorine<br>Teste- DPF<br>Clorimetric<br>Method<br>SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição, |
| Condutividade                    | 753,000    | NE                          | µS/cm                        | Método 2510B<br>SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,   |
| Cor Aparente                     | 135,600    | até 15,000                  | Pt/Co                        | Método 2120B<br>Edição,  |

| Parâmetros                    | Resultados | VMP-PORT.<br>GM/MS<br>N°888 | Unidade                   | Metodologia  |
|-------------------------------|------------|-----------------------------|---------------------------|--|
| Dureza Total                  | 132,000    | até 300,000                 | mg/L<br>CaCO <sub>3</sub> | SMWW, 22<br>Edição,<br>Método 2340C                                      |
| Ferro Total                   | 0,360      | até 0,300                   | mg/L Fe                   | SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,<br>Método 3500-<br>Fe                   |
| Gosto (Intensidade)           | 2,000      | até 6,000                   | Intensidade               | SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,<br>Método 2170B                         |
| Magnésio                      | 18,954     | NE                          | mg/L                      | SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,<br>Método 2340C<br>Cálcio e<br>Magnésio |
| Nitratos                      | 5,998      | até 10,000                  | mg/L NO <sub>3</sub>      | SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,<br>Método 4500<br>NO <sub>3</sub> - D   |
| Nitritos                      | 0,105      | até 1,000                   | mg/L NO <sub>2</sub>      | SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,<br>Método 4500<br>NO <sub>2</sub> - B   |
| Odor (Intensidade)            | <6,000     | até 6,000                   | Intensidade               | SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,<br>Método 2150B                         |
| Potássio                      | 4,680      | NE                          | mg/L K                    | SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,<br>Método 3111D                         |
| Sódio                         | 29,000     | até 200,000                 | mg/L Na                   | SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,<br>Método 3111D                         |
| Sólidos Dissolvidos<br>Totais | 489,450    | até 500,000                 | mg/L                      | SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,<br>Método 2540C                         |
| Sulfato                       | 11,910     | até 250,000                 | mg/L SO <sub>4</sub>      | Smww, 22 <sup>a</sup><br>Edição,<br>Método 4500<br>O42 - E               |
| Turbidez                      | 24,43      | até 5,000                   | UNT                       | SMWW, 22 <sup>a</sup><br>Edição,<br>Método 2130B                         |

**Legislação:** Valores de referência estabelecidos conforme PORTARIA GM/MS No 888, DE 4 DE MAIO DE 2021

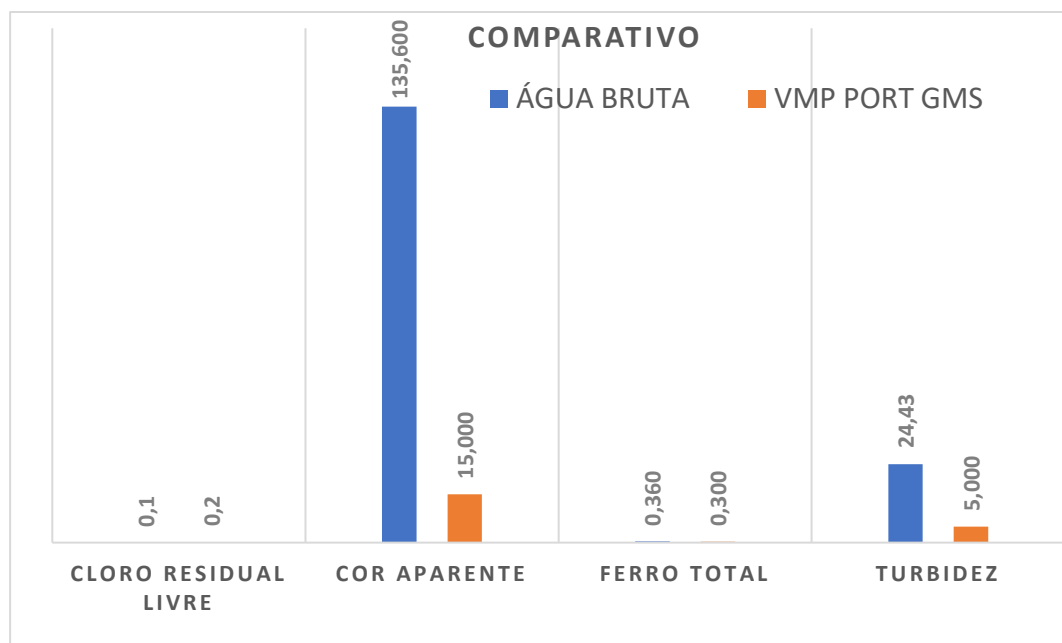
Relatório de Ensaio tipo B

**Legenda:** PORTARIA GM/MS No 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 Art. 32. É obrigatória a manutenção de, no mínimo, 0,2 mg/L de cloro residual livre ou 2 mg/L de cloro residual combinado ou de 0,2 mg/L de dióxido de cloro em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede) e nos pontos de consumo. U pH - Unidade de pH, mg/L - Miligrama por Litro, mg/L em CaCO<sub>3</sub> - Miligrama por litro em Carbonato de Cálcio, mg/L NH<sub>3</sub> - Miligrama por litro de amônia, mg/L Ca - miligrama por litro Cálcio, mgCl-/L - Miligrama de cloreto por litro, µS/cm - Microsiemens por Centímetro, Pt/Co - Platina/Cobalto, mg/L CaCO<sub>3</sub> - miligrama / litro alcalinidade, mg/L Fe - Miligrama por litro de ferro total, Intensidade - Intensidade, mg/L NO<sub>3</sub> - Miligrama por litro de nitrato, mg/L NO<sub>2</sub> - Miligrama por litro de nitrito, mg/L K - miligrama por litro potássio, mg/L Na - miligrama / litro sódio, mg/L SO<sub>4</sub> - Miligramas por litro de sulfatos, UNT - Unidade Nefelométrica de Turbidez L.Q. – Limite de Quantificação, VMP - Valor Máximo Permitido, N.A. - Não Apliável.

Fonte: Autora (2023)

Os parâmetros cloro residual livre, cor aparente, ferro total e turbidez, apresentaram desconformidade em relação aos valores exigidos pela PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021). O cloro residual livre apresentou valores abaixo do intervalo de 0,200 a 0,500 solicitados pela portaria. A cor aparente dispôs de um percentual de 804% acima do permitido pela portaria. O ferro total apresentou 20% acima do limite máximo que a portaria permite, de 0,300. A turbidez apresentou 389% além do permitido.

**Tabela 2: Comparativo dos parâmetros fora do padrão da portaria – água bruta**



Fonte: Autora (2023)

Dentre os parâmetros analisados pelo laboratório, existem alguns que não são discriminados pela PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021), onde foram quantificados, porém não puderam ser comparados com os valores da portaria. A alcalinidade de bicarbonatos apresentou 158,600 mg/L, enquanto a alcalinidade de carbonatos (mg/L em CaCO<sub>3</sub>), fenolftaleína (mg/L) e hidróxidos (mg/L)

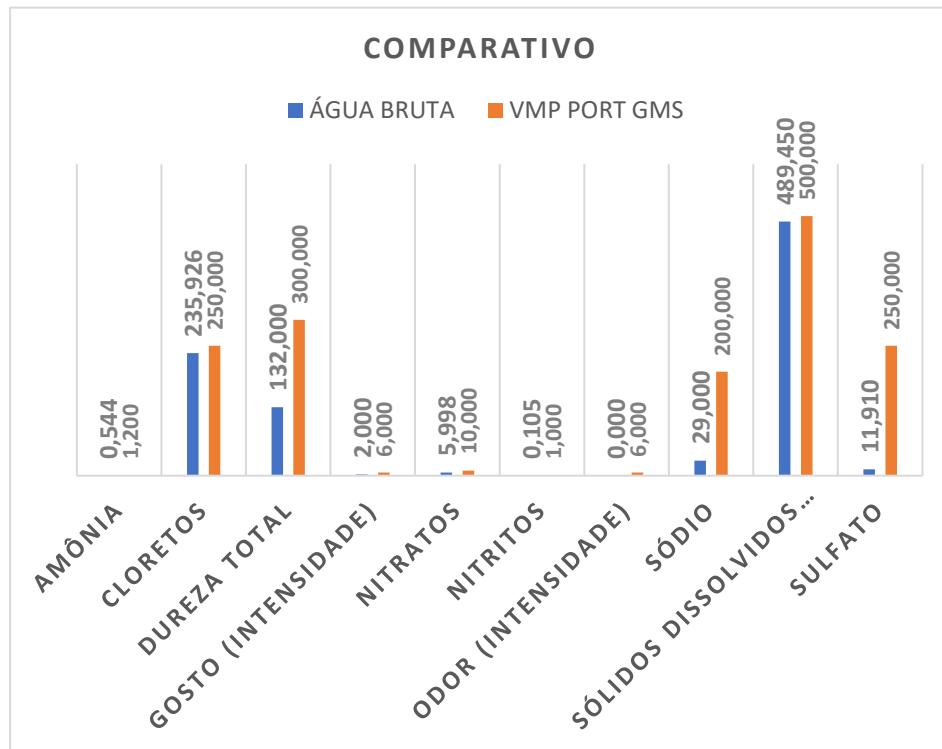
apresentaram valores abaixo de 2,000. O cálcio mostrou 21,600 mg/L Ca, a condutividade 753,000  $\mu\text{S/cm}$ , o magnésio 18,954 mg/L e o potássio 4,680 mg/L K.

A amônia, cloretos e dureza total, apresentaram valores dentro do padrão estabelecido pela PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021). Enquanto a amônia apresentou um valor de 0,544 mg/L  $\text{NH}_3$ , o máximo consentido pela portaria é de 1,200 mg/L  $\text{NH}_3$ , 55% abaixo do valor máximo. Os cloretos apresentaram valores 6% menores que a portaria, onde os cloretos mostraram um valor de 235,926 mg $\text{Cl}^-$ /L, a portaria permite até 250,000. Sobre a dureza total, a portaria tolera um valor de até 300,000 mg/L  $\text{CaCO}_3$ , após a análise, a dureza total da água bruta ficou 56% abaixo do valor permitido, sendo de 132,000 mg/L  $\text{CaCO}_3$ .

Outros parâmetros que permaneceram dentro dos padrões exigidos pela PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021) foram o gosto (intensidade), nitratos e nitritos. O gosto (intensidade) apresentou um valor de 67% menor que o requerido pela portaria, de 2,000 enquanto a portaria demanda de até 6,000. Os nitratos mostraram um valor de 5,998 mg/L  $\text{NO}_3$ , 40% abaixo do valor máximo de 10,000 mg/L  $\text{NO}_3$ . Já os nitritos tiveram um percentual de 90% abaixo do valor máximo imposto pela PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021), onde após a análise o valor foi de 0,105 mg/L  $\text{NO}_2$ , enquanto o máximo permitido é de até 1,000 mg/L  $\text{NO}_2$ .

Os parâmetros de odor (intensidade), sódio, sólidos dissolvidos totais e sulfato, também atenderam aos padrões da PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021). O odor (intensidade) permitido pela portaria é de até 6,000, enquanto o valor após a análise foi abaixo. O sódio apresentou um valor de 86% abaixo do valor máximo, chegando a 29,000 mg/L Na e o permitido é de até 200,000 mg/L Na. Os sólidos dissolvidos totais ficaram apenas 2% abaixo do máximo permitido, apresentaram 489,450 mg/L enquanto o limite é de até 500,000. Já o valor máximo permitido pela PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021) do sulfato é de até 250,000 mg/L  $\text{SO}_4$  e o valor após análise foi de 11,910 mg/L  $\text{SO}_4$ , resultando num percentual 95% comparado com o máximo.

Tabela 3: Tabela comparativo parâmetros dentro do padrão da portaria – água bruta



Fonte: Autora (2023)

Entretanto, a água bruta coletada não foi somente sujeitada a análise físico-química, mas também, a uma análise microbiológica. No Quadro 7 está presente os resultados alcançados, onde o responsável pela análise foi o laboratório HSE Analítica Ambiental.

Os resultados da análise microbiológica da amostra da água bruta, mostra que há coliformes totais e *escherichia coli*. o que indica que a água bruta recebeu despejos domésticos indevidamente. De acordo com os padrões de potabilidade exigidas pela PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021), a água deve apresentar ausência nesses parâmetros. Diante disso, os resultados afirmam que a água bruta não está dentro das conformidades.

Quadro 7: Análise microbiológica da amostra da água bruta

| Parâmetros        | Resultados | VMP-PORT.<br>GM/MS<br>N°888 | Unidade           | Metodologia                           |
|-------------------|------------|-----------------------------|-------------------|---------------------------------------|
| Coliformes Totais | Presença   | Ausência                    | Aus/Pres em 100mL | SMWW 9222 - C - Enzyme Substrate Test |



| Parâmetros       | Resultados | VMP-PORT.<br>GM/MS<br>N°888 |                   | Metodologia                         |
|------------------|------------|-----------------------------|-------------------|-------------------------------------|
|                  |            | Unidade                     |                   |                                     |
| Escherichia coli | Presença   | Ausência                    | Aus/Pres em 100mL | SMWW, 22a Edição, Método 9223 A e B |

Fonte: Autora (2023)

#### 4.3. Resultados da 1ª Etapa do Experimento – melhor tempo de clarificação

Nesta etapa, realizou-se experimentação para a escolha do melhor tempo de clarificação, tendo como base o melhor valor a ser obtido para o parâmetro turbidez. A experimentação foi realizada com coleta de amostra a cada 3 minutos após o início do tratamento, que durou 15 minutos e foram medidos valores de bancada para pH e condutividade.

Os resultados estão apresentados na Tabela 4, onde percebe-se que houve uma manutenção dos valores de pH, o que representa uma estabilidade na faixa de um caráter alcalino da água tratada, e dentro do estabelecido pela legislação PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021). Quanto a Condutividade, observa-se que há uma grande variação, porém não há um valor permitido pela PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021).

Para o parâmetro turbidez, observa-se que o melhor valor obtivo foi no tempo de experimentação 6 minutos. Portanto, adotou-se este tempo como suficiente para aferir, em outro experimento, a eficiência mais abrangente de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, a serem realizados por um laboratório externo.

**Tabela 4 - Melhor tempo de clarificação em relação ao parâmetro de turbidez**

| TEMPO em min | pH         | CONDUTIVIDADE | TURBIDEZ    |
|--------------|------------|---------------|-------------|
| 0            | 8,5        | 278           | 24,21       |
| 3            | 8,4        | 364           | 2,98        |
| <b>6</b>     | <b>8,4</b> | <b>338</b>    | <b>0,22</b> |
| 9            | 8,4        | 322           | 1,63        |
| 12           | 8,5        | 312           | 51          |
| 15           | 8,4        | 261           | 8,16        |

Fonte: Autora (2023).

#### 4.4. Resultados da 2ª etapa do experimento - parâmetros físico-químicos e microbiológicos para água tratada

Nesta 2ª fase de experimentos, adotamos o melhor tempo obtido na 1ª etapa de experimentos que foi de 6 minutos. De acordo com esse tempo de detenção hidráulico foram realizados experimentos. A Figura 18 apresenta os aspectos do antes, durante e depois do experimento.

**Figura 18: Aspectos do experimento**



Fonte: Autora (2023).

Após 6 minutos do processo de tratamento da água, foram coletadas 2 amostras para as análises físico-química e biológica. Na Tabela 5, está um comparativo dos valores obtidos dos tratamentos da água bruta e água tratada em relação aos padrões exigidos pela PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021).

**Tabela 5 - Análise físico-química da água tratada**

| Parâmetro                     | Água Bruta | Água Tratada | V.M.P.           | Unidade                   |
|-------------------------------|------------|--------------|------------------|---------------------------|
| pH à 25°C                     | 8,5        | 8,4          | de 6,000 a 9,000 | U pH                      |
| Alcalinidade de Bicarbonatos  | 158,6      | 109,8        | NE               | mg/L                      |
| Alcalinidade de Carbonatos    | <2,000     | <2,000       | NE               | mg/L em CaCO <sub>3</sub> |
| Alcalinidade de Fenolftaleína | <2,000     | <2,000       | NE               | mg/L                      |
| Alcalinidade de Hidróxido     | <2,000     | <2,000       | NE               | mg/L                      |
| Alcalinidade Total            | 130        | 90           | NE               | mg/L                      |

| <b>Parâmetro</b>           | <b>Água Bruta</b> | <b>Água Tratada</b> | <b>V.M.P.</b>    | <b>Unidade</b>         |
|----------------------------|-------------------|---------------------|------------------|------------------------|
| Amônia                     | 0,544             | <0,100              | até 1,200        | mg/L NH <sub>3</sub>   |
| Cálcio                     | 21,6              | 15,2                | NE               | mg/L Ca                |
| Cloretos                   | 235,926           | 227,929             | até 250,000      | mgCl <sup>-</sup> /L   |
| Cloro Residual Livre       | <0,100            | 0,2                 | de 0,200 a 5,000 | mg/L                   |
| Condutividade              | 753               | 699                 | NE               | µS/cm                  |
| Cor Aparente               | 135,6             | <4,000              | até 15,000       | Pt/Co                  |
| Dureza Total               | 132               | 68                  | até 300,000      | mg/L CaCO <sub>3</sub> |
| Ferro Total                | 0,36              | <0,100              | até 0,300        | mg/L Fe                |
| Gosto (Intensidade)        | 2                 | 2                   | até 6,000        | Intensidade            |
| Magnésio                   | 18,954            | 7,29                | NE               | mg/L                   |
| Nitratos                   | 5,998             | 9,24                | até 10,000       | mg/L NO <sub>3</sub>   |
| Nitritos                   | 0,105             | <0,100              | até 1,000        | mg/L NO <sub>2</sub>   |
| Odor (Intensidade)         | <6,000            | <6,000              | até 6,000        | Intensidade            |
| Potássio                   | 4,68              | 3,48                | NE               | mg/L K                 |
| Sódio                      | 29                | 21                  | até 200,000      | mg/L Na                |
| Sólidos Dissolvidos Totais | 489,45            | 454,35              | até 500,000      | mg/L                   |
| Sulfato                    | 11,91             | 13,03               | até 250,000      | mg/L SO <sub>4</sub>   |
| Turbidez                   | 24,43             | 0,11                | até 5,000        | UNT                    |

Fonte: Autor (2023), baseado nos valores disponibilizados pelo laboratório responsável pelas análises, HSE Analítica Ambiental.

Vale ressaltar que os parâmetros que estavam fora de conformidade quando analisados no seu estado bruto, após o tratamento aplicado ficaram dentro dos padrões exigidos pela PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021).

O cloro residual livre, que apresentava valores abaixo do intervalo solicitado por norma, aumentou para 0,200 mg/L, estando assim dentro do intervalo de 0,200 a 5,000 mg/L. Este resultado comprova uma das vantagens desta tecnologia, a oxidação dos cloretos contidos na água de estudo. Desta reação formam-se o gás cloro que reage com a água formando o hipoclorito de sódio que foi detectado na amostra analisada.

Segundo Leite e Gonçalves (1999), a química do processo de geração de hipoclorito de sódio é baseada na eletrólise parcial de cloreto de sódio contido na

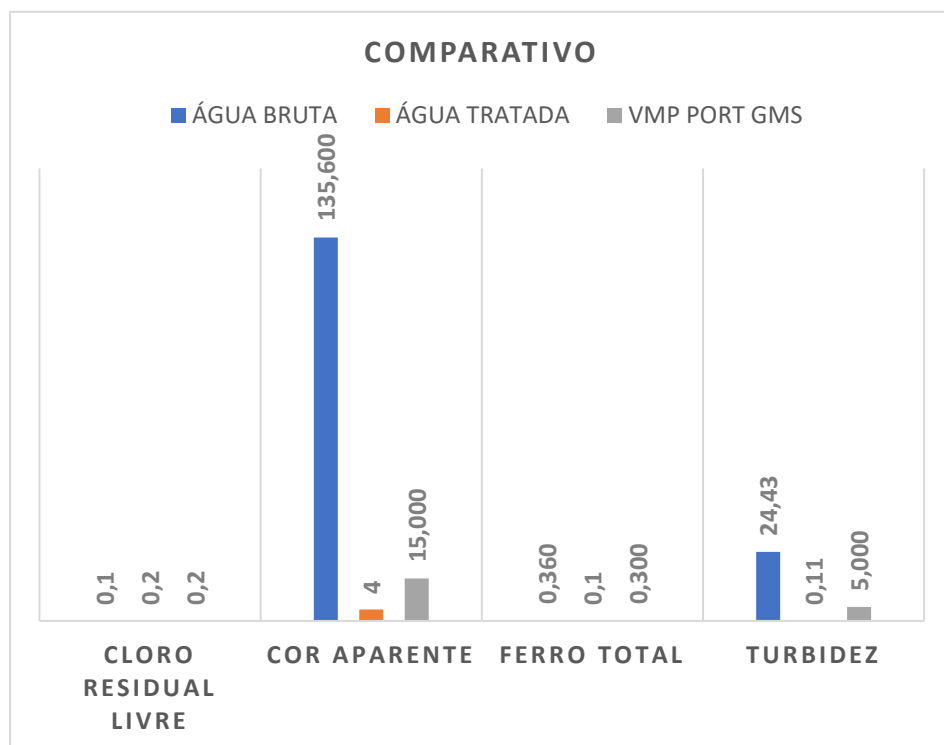
água, quando esta é submetida à corrente contínua em uma câmara eletrolisadora contendo eletrodos anódicos e catódicos.

A cor aparente que apresentou valores no seu estado bruto de 135,600 Pt/Co, após o seu tratamento mostrou valores abaixo de 4,000 Pt/Co, onde o seu limite máximo permitido pela portaria era de até 15,000 Pt/Co.

O ferro total onde antes estava com 0,360 mg/L Fe, passou até um valor abaixo de 0,100 mg/L Fe, estando dentro do permitido pela portaria de 0,300 mg/L Fe.

Por fim, a turbidez após o tratamento obteve uma redução de quase 100% em relação ao seu estado bruto, saindo de 24,430 UNT e passando a ter 0,110 UNT, ficando dentro dos padrões onde seu valor máximo permitido é de até 5,000 UNT.

**Tabela 6: Comparativo dos parâmetros que estavam fora do padrão da portaria após o tratamento**



Fonte: Autora (2023).

Os demais dados obtidos após a análise da água tratada, também permaneceram dentro dos parâmetros exigidos pela PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021).

Assim como a água bruta, a amostra da água tratada também foi submetida a análise microbiológica. A Tabela 7 apresenta os valores

**Tabela 7: Análises microbiológica da água tratada**

| <b>Parâmetros</b> | <b>Água Bruta</b> | <b>Água Tratada</b> | <b>PORTARIA GM/MS N°888</b> | <b>Unidade</b>    |
|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|
| Coliformes Totais | Presença          | Ausência            | Ausência                    | Aus/Pres em 100mL |
| Escherichia coli  | Presença          | Ausência            | Ausência                    | Aus/Pres em 100mL |

Fonte: Autor (2023)

Após o tratamento da água, notou-se que os coliformes totais e *escherichia coli* não foram identificados, estando assim dentro dos padrões da PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021).

## 5. CONCLUSÃO

Os valores obtidos nas análises e exames laboratoriais, fruto dos experimentos realizados nesta pesquisa, suportam conclusões a respeito da aplicabilidade da ozonização associada aos processos de eletroxidação, eletroflotação e eletrocoagulação como alternativa para potabilização de águas urbanas que não atendem ao padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde do Brasil, apresentadas a seguir.

O conjunto tecnológico estudado, quando aplicado nas condições aqui experimentadas, apresenta elevado potencial como alternativa para a ampliação da oferta de água nas áreas urbanas. Sobretudo, para este momento de mudanças climáticas e de escassez de água que se agravam em regiões semiáridas, tornando-se essencial para garantir o abastecimento presente e futuro.

A aplicação da associação tecnológica aqui estudada, com tempo de detenção de 6 minutos, tratando 3 litros de água urbana contaminada foi capaz de zerar a concentração de micro-organismos patogênicos e reduzir parâmetros físico-químicos contaminantes químicos, com destaque para redução nos valores de ferro total em 72%, e redução de 97% de cor aparente.

Destaca-se, que a água tratada adquiriu concentração de cloro residual formado durante a aplicação da tecnologia eletrolítica, sem apresentar custo adicional ao tratamento aplicado, e auxilia na desinfecção da água.

Constata-se o nível elevado de segurança hídrica com relação a redução alcançada nos níveis de turbidez. Segundo Abdala Neto (2012), considera-se turbidez da água filtrada como indicador de desempenho especialmente por sua correspondência com a remoção de protozoários, especificamente correlacionando a remoção desta característica física à cistos e oocistos de deste patógeno.

Portanto, a associação tecnológica aqui estudada, e nas condições operacionais experimentadas, foi capaz de adequar a qualidade da água de estudo ao padrão de potabilidade exigidos pela PORTARIA GM/MS N° 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 (Brasil, 2021) para águas de abastecimento humano.

## REFERÊNCIAS

ABDALA NETO, E. F; NASCIMENTO, R. F; RIBEIRO, J. P; OLIVEIRA, A. G, ROMERO, F. B. **Processos Eletrolíticos: Fundamentos e aplicações em matrizes ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária UFC, 2021.

Agência Nacional de Águas (ANA). **Conjuntura Recursos Hídricos Brasil 2019: Quantidade e Qualidade de Águas**. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/quantiquali> . Acesso em: 24 out. 2023.

AGNESINI, Marília Vasconcelos. **Avaliação de um sistema piloto de filtração direta descendente para produção de água de reuso a partir de efluente de esgoto sanitário**. 2020. Tese (Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental) - Centro de Ciências Exatas Naturais e Tecnologias, Universidade de Ribeirão Preto. Ribeirão Preto, 2020.

ALVES, Indemberg Araújo. **Radiação ultravioleta aplicada à desinfecção de águas superficiais urbanas**. TCC (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Universitário Christus. Fortaleza, 2021.

ARAGÃO, Alexander. **Tratamento de água: etapas do sistema convencional**. Canteiro de Engenharia, 2020. Disponível em: <https://canteirodeengenharia.com.br/2020/07/08/tratamento-de-agua/> .Acesso em: 26 de abril de 2023.

ARBOLEDA, J.V. 1973. **Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua**. CEPIS, 558p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público**. Rio de Janeiro. 1992.

BARBALHO, Bruno Castro. **Otimização do tratamento de água de manancial com baixa turbidez e cor elevada utilizando filtração direta e dupla filtração**. 2020. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química-PPGEQ) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2019.

BARBOSA, Alene de Oliveira. **Uso da radiação ultravioleta como técnica avançada de tratamento de água**. 2016. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. Disponível em: [http://ct.ufpb.br/ccec/contents/documentos/tccs/copy\\_of\\_2016.1/uso-da-radiacao-ultravioletacomo-tecnica-avancada-de-tratamento-de-agua.pdf](http://ct.ufpb.br/ccec/contents/documentos/tccs/copy_of_2016.1/uso-da-radiacao-ultravioletacomo-tecnica-avancada-de-tratamento-de-agua.pdf) . Acesso em: 25 mar. 2023.

BASTOS, Fernanda Pereira. **Tratamento de água de chuva através de filtração lenta e desinfecção UV**. 2007. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/1933/1/Dissertacao%20Fernanda%20Bastos.pdf>. Acesso em: 26 abril. 2023.

BILOTTA, P.; DANIEL, L. A. **Advanced process of microbiological control of wastewater in combined system of disinfection with UV radiation**. *Water Science & Technology*, v. 61, n. 10, p. 2469-2475, 2010. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2010.155>

BILOTTA, Patrícia. **Estudo comparativo da ação do ozônio e radiação uv na desinfecção de esgoto sanitário**. Dissertação (Mestre em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

BILOTTA, P.; DANIEL, L. A. **Utilização de lâmpadas germicidas na desinfecção de esgoto sanitário**. *AmbiÁgua*, Taubaté, v. 7, n. 1, p. 120-129, 2012. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.845>

BITTON, G. **Wastewater microbiology**. New York: John Wiley & Sons, 1994. 280p.

BRAGA, T.S. et al. **Estudo da aplicação de ozônio para pré-tratamento de água para abastecimento**. In: Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA, 13, 2007, São José dos Campos. Anais [...].

CHAVES, G.; VERONA, L. B.; NOGUEIRA, M. R. C.; BUSS, M. V. **TRATAMENTOS DE ÁGUAS POR OZONIZAÇÃO: REVISÃO**. *Anuário Pesquisa e Extensão Unoesc Videira, [S. l.]*, v. 1, p. e12560, 2016

CHEN, X.; CHEN, C.; YUE, P. I.; *Sep. Purif. Technol.* **2000**, 19, 65.

DANIEL, L. A. **Processos de Desinfecção e Desinfetantes Alternativos na Produção de Água Potável**. São Carlos: PROSAB, 2001. 35p

DEZOTTI, M., *et al.* **Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos**. Rio de Janeiro: E-papers. 2008. 360 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. São Carlos: Rima, 2005. 784 p.



DI BERNARDO, L.; WIECHETECK, G. K; BENINI B. D. S. **Utilização da dupla filtração ascendente de areia grossa para remoção de substâncias húmicas.** ABES, Anais. Joinville-SC. 2003.

DI BERNARDO, L. (Coord.) et al. **Tratamento de Água para Abastecimento por Filtração Direta, PROSAB 3.** ABES pp. 480. São Carlos 2003

FORTES, A. C. C., P. R. G. B. D. C. K. **A vigilância da qualidade da água e o papel da informação na garantia do acesso.** Saúde Debate, Rio de Janeiro, v. 43, n. 3, p. 20-34, Dezembro 2019.

GLAZE (1987) Glaze, W. H. **Drinking-water treatment with ozone.** Environment Science Technology, 21(3):224–229, 1987.

HÉLLER, L.; PÁDUA, V.L. de. **Abastecimento de água para consumo humano.** 2º ed. Belo Horizonte. Editora: UFMG, 2010.

Instituto Nacional do Semiárido – INSA. **Desertificação e mudanças climáticas no semiárido brasileiro.** Disponível em: <https://portal.insa.gov.br/images/acervo-livros/Desertifica%C3%A7%C3%A3o%20e%20Mudan%C3%A7as%20Clim%C3%A1ticas%20no%20Semi%C3%A1rido%20Brasileiro.pdf> . Acesso em: 19 de set. 2023.

JUNG, H.; CHOI, H. **Catalytic decomposition of ozone and para-chlorobenzoic acid (pCBA) in the presence of nanosized ZnO.** Applied Catalysis B: Environmental, v. 66, p. 288-294, 2006.

KERRY HOWE, D. H. J. C. R. R. T. G. T. **Princípios de Tratamento de Água.** 1ª. ed. [S.l.]: Cengage Learnin, 2016.

LAPOLLI, F. R. et al. **Desinfecção de efluentes sanitários por meio da ozonização.** In: GONÇALVES, R. F. (Coord.). **Desinfecção de efluentes sanitários, remoção de organismos patogênicos e substâncias nocivas: aplicações para fins produtivos como agricultura, aquicultura e hidroponia.** Projeto PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. p. 169-208.

LEITE, N. F.; Gonçalves, C.C. **Sistema De Cloração De Angra I: Hipoclorito De Sódio Gerado A Partir Da Água Do Mar, Uma Nova Realidade.** Rio de Janeiro, RJ: Associação Brasileira de Energia Nuclear, 1999.

LIBÂNIO. M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água.** Campinas, SP. Editora Átomo, 4ª Ed, 2017.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água.** 3ª ed. Campinas/SP: Editora Átomo, 2010.

LIMA, Julyenne Kerolainy Leite. **Avaliação da filtração direta descendente no tratamento de água manancial com baixa turbidez e cor elevada**. 2019. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Uso Sustentável de Recursos Naturais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte. Natal, 2019.

LIMA, D.R.S.; TONUCCI1, M.C.; LIBÂNIO, M.; AQUINO, S.F. **Fármacos e desreguladores endócrinos em águas brasileiras: ocorrência e técnicas de remoção**. Eng Sanit Ambient.v.22 n.6. 2017.

LIMA. G. J. de A. **Uso de polímero natural do quiabo como auxiliar de floculação e filtração em tratamento de água e esgoto**. 154 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ, 2007.

LOGSDON, G.S. (2008). **“Slow Sand Filtration”** In: Longsdon, G.S. Water Filtration Practices. American Water Works Association, E.U.A., 211-228.

LOPES, M. A. C. Q. **Ministério da Saúde**. Ministério da Saúde, 2021. Disponível em: <[https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888\\_07\\_05\\_2021.html](https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html)>. Acesso em: 03 Março 2023.

LOTIERZO, M.; FÉLIERS, C.; FAUREL, N.; LE GRAND, L.; SABY, S.; CERVANTES, P. **Synergistic effects of sequential treatment by UV irradiation and chemical disinfectant for drinking water disinfection**. In: UV WORLD CONGRESS, 2., 03-05 jul. 2003, Vienna. Proceedings... Vienna: IU Light Association, 2003.

MACHADO, B. M., **Potabilização de água com elevada densidade de cianobactérias e microalgas através de Sistema de dupla filtração em meio granular utilizando filtro de lavagem contínua**. Tese (Doutorado – Programa de Pós-graduação Engenharia Ambiental) – Universidade de Santa Catarina, 2011.

MACHULEK JUNIOR, A.; CANATTO, A. K.; SILVA DE BRITO, D. A.; RIBEIRO, M. L. REVIEW: REMOÇÃO DE PARABENOS POR PROCESSO DE OZONIZAÇÃO. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 1095–1112, 2022. DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.3.80578. Disponível em: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/80578>. Acesso em: 19 abr. 2023.

MAGARA, Y; ITOH, M.; MORIOKA, T. **Application of ozone to water treatment and poxer consumption of ozone generating systems**. Progress in Nuclear Energy, v. 29 supplement, p. 175-182, 1995. [https://doi.org/10.1016/0149-1970\(95\)00041-H](https://doi.org/10.1016/0149-1970(95)00041-H)

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

MARENCO, José A. et al. **Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**, v. 1, 2011. Acesso em: 23 de fev. 2020.

MARQUES, Flávia. **O que é e para que serve a filtração no tratamento de água?**. Acqua Solution, XXXX. Disponível em: <https://acquablog.acquasolution.com/o-que-e-e-para-que-serve-a-filtracao-no-tratamento-de-agua/> . Acesso em: 26 de abril de 2023.

MARTINS, D. C. C., SCANDELA, A. P. J., SYLLOS, Renan Souza de, TAVARES, C. R. G. **Ozonização como tratamento de lixiviado de aterro sanitário: um estudo de revisão**. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*. Curitiba, v.4, n.3, p.3404-3417, Julho, 2021.

MAUSTELLER (1989) Mausteller, J. W. **Ozone**. MSA Research Corporation, 1989.

MELLO, A. M, E. A. D. M. R. M. G. C. R. M. A. C. D. M. **Otimização de pré-oxidação em tratamento de água superficial para abastecimento público, conjugando Ultrassom com ClO<sub>2</sub>/NaClO: Determinação de subprodutos via HS-GC-MS**. XXVIII Congresso.

Mollah, M. Y., Pathak, S. R., Patil, P. K., Vayuvegula, M., Agrawal, T. S., Gomes, J. A. G., Kesmez, M., & Cocke, D. L. (2004). **Treatment of orange II azodye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes**. *Journal of Hazardous Materials*, 109(1-3), 165-171.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Wastewater engineering: treatment and resource recovery**. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. 2018 p.

MOLLAH, M. Y. A.; SCHENNACH, R.; PARGA, J.; COCKE, D. I.; *J. HAZARD. Mater.* **2001**, *84*, 29.

NETO, Sidney Aquino de et al. **Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em química**. *Química Nova* [online]. 2011, v. 34, n. 8., pp. 1468-1471. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/KGGWSDdTmKWz4XMbg6YWK7C/?lang=pt>

. Acesso em: 05 mar. 2023.

NETTO, J.M.A; RICHTER, C.A. **Tratamento de Água**. 1° ed. São Paulo: Bulcher, 1991.

PEIXOTO, A. L. C. **Ozonização catalítica homogênea do chorume proveniente do antigo aterro controlado da cidade de Guaratinguetá –SP utilizando os íons Fe<sup>2+</sup>, Fe<sup>3+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup> e Cr<sup>3+</sup>**. 2008. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) -Universidade de São Paulo, Lorena, 2008

RAKNESS, K. L. (Ed). (2005). **Ozone in Drinkin Water Treatment: Process, Design, Operation, and Optimization**. 302p. American Water Works Association (AWWA). Disponível: [https://books.google.com/books?q=&as\\_brr=0](https://books.google.com/books?q=&as_brr=0) . Acesso em 28 de abril de 2023

RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologia no Tratamento**. 1. ed. São Paulo: Blucher, v. 1, 2009.

SABOGAL PAZ, L.P. (2010) **Seleção de tecnologias de tratamento de água para abastecimento de comunidades de pequeno e médio porte**. Relatório Final (Pesquisa de Pós-doutorado). São Paulo: FAPESP.

SCALIZE, Paulo Sérgio Scalize. **Tecnologias sociais de saneamento rural: partes constituintes e tecnologias de tratamento de água**. CESSA, XXXX. Disponível em: [https://publica.ciar.ufg.br/ebooks/saneamento-e-saude-ambiental/modulos/5\\_modulo\\_saneamento/02-1.html](https://publica.ciar.ufg.br/ebooks/saneamento-e-saude-ambiental/modulos/5_modulo_saneamento/02-1.html) . Acesso em: 26 de abril de 2023.

SILVA, G. H. R. **Formação de aldeídos e trialometas da desinfecção por ozonização, cloração e ozonização/cloração de efluente de tratamento anaeróbico de esgoto sanitário**. 2008. 401 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008

SPERLING, M.V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2017.

SOARES, L. V. **Ozonização de esgoto sanitário: estudo da hidrodinâmica, transferência de massa inativação de microrganismos indicadores**. 2007. 249 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) -Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

**Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE)**. Disponível em: <http://www.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido> . Acesso em: 12 de set. 2023

TCHOBANOGLIOUS, George. METCALF & EDDY: **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 1980 p. ISBN 978-85-8055-523-3. Português.

TINÔCO, Juliana Delgado. **Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica**. 2011. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. doi:10.11606/T.18.2012.tde-04052012-093819. Acesso em: 26 abril 2023.

TRATAMENTO químico para estação de tratamento de água. Kurita, Brasil, 3 p.

UNITED STATES Environmental Protection Agency - USEPA. **Alternative disinfectants and oxidants guidance manual: 815-R-99-014.**, Washington D.C., 1999. 346p.

WANG, J. L.; WANG, L.; WANG, B. Z.; ZGHAN, J. S.; HUANG, W. Z. **Suspended particle effects on ultraviolet light disinfection of effluent and the improvement**. Water Practice & Technology, v. 1, n. 2, 183-192, 2006.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION - WEF. **Wastewater disinfection: manual of practice**. Alexandria, 1996. 230 p.

Zanella, M. E. (2014). **Considerações sobre o clima e os recursos hídricos do semiárido nordestino**. Caderno Prudentino de Geografia, (36), 126-142.