



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

SARAH BEATRIZ RODRIGUES DA CRUZ

**SISTEMA COMPACTO DE TRATAMENTO DE ÁGUA SUPERFICIAL:
CONSTRUÇÃO, AVALIAÇÃO OPERACIONAL E ESTUDO DO DESEMPENHO**

JOÃO PESSOA

2024

SARAH BEATRIZ RODRIGUES DA CRUZ

**SISTEMA COMPACTO DE TRATAMENTO DE ÁGUA SUPERFICIAL:
CONSTRUÇÃO, AVALIAÇÃO OPERACIONAL E ESTUDO DO DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Coordenação de Engenharia Química do
Centro de Tecnologia da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento aos
requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Química.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Vivian Stumpf
Madeira

JOÃO PESSOA

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C957s Cruz, Sarah Beatriz Rodrigues da.

Sistema compacto de tratamento de água superficial:
construção, avaliação operacional e estudo do
desempenho / Sarah Beatriz Rodrigues da Cruz. - João
Pessoa, 2024.
58 f. : il.

Orientação: Vivian Stumpf Madeira.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Tratamento de água. 2. Pré-oxidação. 3.
Coagulação. 4. Filtração. 5. Ozonização. I. Madeira,
Vivian Stumpf. II. Título.

UFPB/CT

CDU 66(043.2)

SARAH BEATRIZ RODRIGUES DA CRUZ

**SISTEMA COMPACTO DE TRATAMENTO DE ÁGUA SUPERFICIAL:
CONSTRUÇÃO, AVALIAÇÃO OPERACIONAL E ESTUDO DO DESEMPENHO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 21 de outubro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof(a). Dr(a). Vivian Stumpf Madeira
Orientador (a)

Prof(a). Dr(a). Sharline Florentino de Melo Santos
Examinador (a)

Prof(a). Dr(a). Claudia de Oliveira Cunha
Examinador (a)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a Nossa Senhora, por me sustentarem nos momentos de aflição, renovando minhas forças sempre que julguei não conseguir seguir adiante.

Aos meus pais, Reginaldo e Cintya, por todo o esforço e dedicação para que eu pudesse concluir minha graduação, mesmo estando longe de casa. Seu apoio foi fundamental em cada passo desta jornada. Ao meu irmão Guilherme, por acreditar no meu potencial e me encorajar a não desistir, mesmo diante dos momentos mais desafiadores.

Um agradecimento especial aos meus avós, Mário e Rita, que não mediram esforços para garantir meu sucesso. Sua sabedoria e persistência foram essenciais ao longo da minha jornada. De maneira geral, expresso minha gratidão a toda a minha família, cujo apoio e compreensão foram pilares essenciais para a conclusão deste curso.

Aos meus colegas de turma, agradeço por terem transformado a caminhada da graduação em uma experiência mais leve, compartilhando não apenas os desafios, mas também os momentos de aprendizado e crescimento.

Aos colegas do LACQUA, que ao longo desses últimos meses, compartilharam comigo as ansiedades e aflições da reta final do curso. Agradeço a todos vocês por fazerem parte desta etapa.

Por fim, um agradecimento especial à minha orientadora, professora Vivian, por confiar em meu potencial e me fornecer ensinamentos valiosos. Sua orientação e sabedoria foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação profissional.

RESUMO

A disponibilidade de água potável é uma preocupação crescente em várias partes do mundo, incluindo o Brasil, onde desigualdades socioeconômicas e regionais intensificam a dificuldade no acesso à água tratada. A falta de água de qualidade está diretamente ligada à contaminação e à propagação de doenças transmitidas pela água, como diarreia, cólera e hepatite. Nesse contexto, sistemas compactos de tratamento de água surgem como soluções viáveis e adaptáveis, capazes de melhorar a qualidade de vida em comunidades com infraestrutura deficiente. Este estudo teve como objetivo desenvolver um sistema compacto de tratamento de água, composto pelas etapas de pré-oxidação, coagulação, filtração, adsorção em carvão ativado e desinfecção com ozônio. A água de estudo foi coletada no rio Mandacaru, localizado na cidade de João Pessoa-PB. Foram coletadas amostras da água bruta e após cada etapa do tratamento, e realizadas análises físico-químicas para avaliar a remoção de cor e turbidez, e análises microbiológicas, com foco na inativação de coliformes totais e *E. coli*. Os resultados demonstraram uma eficiência máxima de 98% na remoção de cor aparente e turbidez, destacando-se o pré-tratamento com NaClO e $Al_2(SO_4)_3$ como a etapa mais efetiva para esses parâmetros. As análises microbiológicas revelaram a inativação total dos microrganismos em duas condições experimentais. Os resultados confirmam que o sistema desenvolvido, partindo-se de uma água bruta, classificada originalmente como Classe 3, porém com elevada contaminação, foi capaz de atender aos padrões de potabilidade para água estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

Palavras-chave: Tratamento de água; Pré-oxidação; Coagulação; Filtração; Ozonização.

ABSTRACT

The availability of drinking water is a growing concern in many parts of the world, including Brazil, where socioeconomic and regional inequalities intensify the difficulty in accessing treated water. The lack of quality water is directly linked to the contamination and spread of waterborne diseases, such as diarrhea, cholera, and hepatitis. In this context, compact water treatment systems emerge as viable and adaptable solutions, capable of improving the quality of life in communities with deficient infrastructure. This study aimed to develop a compact water treatment system, consisting of the stages of pre-oxidation, coagulation, filtration, adsorption in activated carbon, and disinfection with ozone. The study water was collected from the Mandacaru River, located in the city of João Pessoa-PB. Samples of the raw water and after each stage of treatment were collected, and physicochemical analyses were performed to evaluate the removal of color and turbidity, and microbiological analyses, focusing on the inactivation of total coliforms and *E. coli*. The results demonstrated a maximum efficiency of 98% in the removal of apparent color and turbidity, with pretreatment with NaClO and $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ standing out as the most effective step for these parameters. Microbiological analyses revealed the total inactivation of microorganisms in two experimental conditions. The results confirm that the developed system, starting from raw water, originally classified as Class 3, but with high contamination, was able to meet the potability standards for water established by Ordinance GM/MS No. 888/2021.

Keywords: Water treatment; Pre-oxidation; Coagulation; Filtration; Ozonization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relação entre as classes de enquadramento com o uso da água	15
Figura 2 - Bacia hidrográfica do rio Paraíba	24
Figura 3 - a) Mapa de localização; b) Mapa topográfico	25
Figura 4 - Local e coleta	26
Figura 5 - Configuração do sistema de tratamento	28
Figura 6 - Fluxograma do processo	29
Figura 7 - Sistema de pré-tratamento	29
Figura 8 - Esquema do filtro de areia	30
Figura 9 - Esquema da coluna de adsorção	31
Figura 10 - Esquema da coluna de desinfecção	32
Figura 11 - Equipamentos utilizados na desinfecção: (a) Cilindro de oxigênio e gerador de ozônio; (b) Tubos de PVC para recheio.....	32
Figura 12 - Curva de calibração para quantificação do ozônio	35
Figura 13 - Remoção de cor aparente em função do oxidante	37
Figura 14 - Remoção de cor verdadeira em função do oxidante	37
Figura 15 - Remoção de turbidez em função do oxidante	38
Figura 16 - Remoção da cor aparente em função da dosagem de coagulante	38
Figura 17 - Remoção da cor verdadeira em função da dosagem de coagulante	39
Figura 18 - Remoção de turbidez em função da dosagem de coagulante	39
Figura 19 - Curva de saturação do ozônio dissolvido	40
Figura 20 - Comparação da cor da água: (a) água bruta; (b) após pré tratamento; (c) após filtração; (d) após adsorção; (e) após desinfecção	42
Figura 21 - Remoção de cor aparente no pré-tratamento, filtração e adsorção.....	42
Figura 22 - Remoção de cor aparente na desinfecção.....	43
Figura 23 - Remoção de cor verdadeira no pré-tratamento, filtração e adsorção.....	43
Figura 24 - Remoção de cor verdadeira na desinfecção	44
Figura 25 – Remoção de turbidez no pré-tratamento, filtração e adsorção	45
Figura 26 – Remoção de turbidez na desinfecção	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores Máximos Permitidos	15
Tabela 2 - Padrões de Turbidez para água pós-desinfecção ou pós-filtração.....	17
Tabela 3 - Padrões bacteriológicos	18
Tabela 4 - Potencial de oxidação de compostos oxidantes	22
Tabela 5 - Concentrações de coagulante e oxidante	27
Tabela 6 - Materiais utilizados no sistema	28
Tabela 7 - Características do meio filtrante e da camada suporte	30
Tabela 8 - Metodologia aplicada nas análises físico-químicas	33
Tabela 9 - Características da água de estudo	36
Tabela 10 - Remoção (%) após decantação	39
Tabela 11 - Condições das amostras	41
Tabela 12 - Remoção (%) de cor aparente em cada etapa.....	43
Tabela 13 - Remoção (%) de cor verdadeira em cada etapa.....	44
Tabela 14 - Remoção (%) de turbidez em cada etapa.....	45
Tabela 15 - Resultado das análises microbiológicas após filtração	46
Tabela 16 - Resultado das análises microbiológicas após adsorção	47
Tabela 17 - Resultado das análises microbiológicas após desinfecção	48
Tabela 18 - Concentração final de O ₃ e valores de C*t	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA Agência Nacional de Águas

CAG Carvão Ativado Granular

CONAMA Conselho Nacional do Meio Ambiente

CT Coliformes Totais

DBO Demanda Bioquímica de Oxigênio

DIEP Diretoria de Estudos e Pesquisas Ambientais

E. coli Escherichia coli

ETA Estação de Tratamento de Água

LACQUA Laboratório de Cromatografia e Quimiometria Aplicada

MON Matéria Orgânica Natural

OD Oxigênio Dissolvido

OMS Organização Mundial de Saúde

ONU Organização das Nações Unidas

PPT Partes por trilhão

SEMAM Secretaria Municipal de Meio Ambiente

SNIS Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

UFC Unidade Formadora de Colônia

UFPB Universidade Federal da Paraíba

UT Unidade de Turbidez

VMP Valores Máximos Permitidos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	OBJETIVO GERAL.....	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	13
3.1	QUALIDADE E DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO	13
3.2	CRITÉRIOS DE CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS POR ENQUADRAMENTO	13
3.3	PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA PARA O CONSUMO HUMANO.....	15
3.4	PROCESSOS DE TRATAMENTO DA ÁGUA	18
3.4.1	Pré-oxidação	18
3.4.2	Coagulação	19
3.4.3	Filtração	20
3.4.4	Adsorção	21
3.4.5	Desinfecção.....	21
3.4.5.1	Ozonização	22
4	METODOLOGIA	24
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	24
4.1.1	Definição do ponto de coleta	25
4.2	TESTES EM JAR TEST	26
4.2.1	Definição do oxidante.....	27
4.2.2	Determinação da concentração do Coagulante.....	27
4.3	SISTEMA DE TRATAMENTO	27
4.3.1	Pré-tratamento.....	29
4.3.2	Sistema de filtração.....	29
4.3.3	Sistema de adsorção.....	30
4.3.4	Sistema de desinfecção por ozônio	31
4.4	COLETA E ANÁLISES DAS AMOSTRAS	33
4.4.1	Análises físico-químicas	33
4.4.2	Análises Microbiológicas	33
4.4.2.1	Inativação microbiana	34

4.5	QUANTIFICAÇÃO DO OZÔNIO EM ÁGUA LIMPA	34
4.6	QUANTIFICAÇÃO DO OZÔNIO EM ÁGUA CONTAMINADA - CURVA ANALÍTICA COM O MÉTODO DPD	34
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA EM ESTUDO.....	36
5.2	TESTES EM JAR TEST.....	36
5.2.1	Definição do oxidante.....	36
5.2.2	Definição da concentração de coagulante.....	38
5.3	SATURAÇÃO DO OZÔNIO EM ÁGUA	40
5.4	EFICIÊNCIA DO SISTEMA CONTÍNUO DE TRATAMENTO DA ÁGUA.....	41
5.4.1	Eficiência do tratamento físico-químico.....	41
5.4.2	Eficiência do tratamento microbiológico.....	46
6	CONCLUSÃO	50
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIA	52

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a vida e o desenvolvimento humano, no entanto, a disponibilidade de água potável se tornou uma preocupação crescente em várias regiões do mundo. A escassez e a contaminação da água são questões críticas que transcendem fronteiras nacionais, afetando países em diferentes estágios de desenvolvimento. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que cerca de 2 bilhões de pessoas ainda não têm acesso à água potável, o que contribui para a disseminação de doenças e para a mortalidade infantil em diversas regiões, especialmente na África e na Ásia (UNICEF; WHO, 2019).

No Brasil, o cenário não é diferente, uma vez que as desigualdades socioeconômicas e regionais intensificam os desafios relacionados ao acesso à água potável e saneamento básico. Enquanto algumas regiões, como o Sudeste, apresentam um acesso relativamente dominador pela água tratada, o Nordeste enfrenta desafios significativos. Com a concentração de apenas 3,3% dos recursos hídricos do país, essa região é vulnerável a longos períodos de seca, o que intensifica a escassez de água potável (SILVA, 2021; ANA, 2020).

Além da escassez, a contaminação dos mananciais de água doce é um dos maiores desafios à saúde pública, pois está diretamente envolvida na propagação de doenças, especialmente em áreas sem saneamento básico adequado (LIBÂNIO et al., 2005). Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), o acesso à água potável e a serviços de saneamento é um dos fatores mais críticos para o controle e a erradicação de doenças.

A contaminação da água não tratada pode ser um vetor para a disseminação de diversas enfermidades, como diarreia e leptospirose, reforçando a necessidade de monitoramento e controle rigorosos da qualidade da água (WHO, 2019). Para assegurar que a água seja adequada para o consumo humano, é necessário que ela atenda aos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação vigente. No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, estabelece diretrizes sobre a qualidade da água, exigindo, entre outros parâmetros, a ausência de coliformes totais e de *Escherichia coli* (CARDOSO, 2022).

Esse cenário de crise hídrica e poluição reforça a necessidade de tecnologias de tratamento de água que sejam não apenas eficazes, mas também adaptáveis às realidades locais. Nesse contexto sistemas compactos de tratamento de água, se mostram promissores na oferta de soluções práticas e econômicas, especialmente em áreas remotas ou com infraestrutura deficiente.

Esses sistemas, caracterizados por sua simplicidade operacional e reduzido espaço físico, são capazes de remover impurezas, como partículas em suspensão e contaminantes

microbiológicos, garantindo a potabilidade da água e melhorando a qualidade de vida das comunidades que enfrentam a deficiência de água tratada.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar a eficiência de um sistema compacto de tratamento de água, integrando as etapas de pré-oxidação, coagulação, filtração, adsorção e desinfecção com ozônio. A pesquisa incluiu uma avaliação detalhada da eficiência individual de cada etapa do tratamento, bem como do sistema completo, por meio de análises físico-químicas e microbiológicas. O foco principal foi projetar um sistema acessível e economicamente viável, utilizando materiais como PVC, que sejam de fácil manutenção e operação, garantindo o tratamento contínuo da água e o atendimento aos padrões de potabilidade.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver e avaliar o desempenho de um sistema compacto de tratamento de água superficial, com operação em fluxo contínuo e integrando as etapas de pré-oxidação, coagulação, filtração, adsorção e desinfecção por ozonização.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a qualidade da água do rio Mandacaru, afluente do rio Paraíba, por meio da análise de parâmetros físico-químicos e microbiológicos, para identificar seu estado de preservação e conformidade com padrões ambientais;
- Projetar e construir um sistema compacto de tratamento de água em escala laboratorial, operando em fluxo contínuo, que inclui as etapas de pré-oxidação, coagulação, filtração, adsorção e desinfecção;
- Analisar a influência operacional dos parâmetros de oxidação e coagulação no desempenho do sistema proposto;
- Avaliar a eficiência de cada etapa do sistema na remoção de parâmetros físico-químicos (como cor e turbidez) e microbiológicos (incluindo Coliformes totais e *Escherichia coli*).

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Qualidade e Distribuição da Água para Consumo Humano

O acesso à água tratada é um indicador global de desenvolvimento sustentável, sendo essencial para a melhoria da saúde e higiene. No entanto, a escassez de água potável, impulsionada pelo crescimento populacional e pela intervenção humana em áreas urbanas e rurais, é uma realidade preocupante (FRANCO, 2015).

O Brasil, conhecido por sua vasta disponibilidade de recursos hídricos, enfrenta desafios significativos no que tange à distribuição e tratamento da água. Apesar de possuir aproximadamente 12% da água doce do planeta, o país enfrenta questões complexas relacionadas à infraestrutura de distribuição, tratamento e qualidade da água.

De acordo com os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) de 2022, apenas 84,9% da população tem acesso a água potável, deixando cerca de 33 milhões de pessoas sem água tratada. A ausência de água de qualidade está diretamente relacionada à propagação de doenças de veiculação hídrica, como diarreia, febre tifoide, cólera e hepatite (CARDOSO, 2022; SANTOS, et al., 2020).

No Brasil, as normas que regulam a qualidade da água são fundamentadas em limites máximos permitidos para diversos atributos que a caracterizam, com o intuito de garantir a saúde ambiental e humana. A água destinada ao consumo humano é regulamentada pela Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, que define procedimentos para controle e vigilância da qualidade, além de estabelecer padrões de potabilidade (BRASIL, 2021; CARDOSO, 2022).

3.2 Critérios de Classificação das Águas por Enquadramento

Os critérios de classificação dos corpos de água são definidos para garantir que a qualidade da água atenda às necessidades específicas para os diversos usos a que se destina, protegendo a saúde pública e o meio ambiente. No Brasil, esses critérios são definidos na Resolução CONAMA nº 357 de 17 março de 2005, para as águas doces, salobras e salinas (BRASIL, 2005).

De acordo com a Resolução CONAMA 357, é essencial que os valores dos parâmetros analisados sejam compatíveis com os principais usos da água, visando evitar custos ambientais e econômicos desnecessários.

As águas doces, salobras e salinas do Território Nacional são classificadas, segundo a qualidade requerida para os seus usos preponderantes, em treze classes de qualidade. As águas de melhor qualidade podem ser aproveitadas em uso menos exigente, desde

que este não prejudique a qualidade da água, atendidos outros requisitos pertinentes. (Resolução CONAMA N° 357, p. 5, 2005).

Desta forma, os corpos hídricos são classificados de acordo com sua qualidade, sendo as águas de natureza doce as únicas indicadas para o consumo humano.

O enquadramento dos corpos hídricos se refere ao processo de classificação das águas naturais, considerando fatores como sua proximidade às nascentes, seu porte, seu propósito primário, a presença de zonas urbanas ou unidades de conservação em seu curso, entre outros aspectos técnicos, sociais, econômicos e políticos. Salvo um novo processo de enquadramento, não é possível alterar individualmente a classe de um corpo hídrico, já enquadrado anteriormente, portanto, no caso de um determinado ambiente aquático exibir parâmetros com valores divergentes dos limites definidos pela legislação, medidas de remediação deverão ser tomadas para favorecer a normalização de tais valores. As águas doces, são classificadas em 5 classes:

- a) **Classe Especial:** Águas destinadas ao abastecimento público com tratamento simplificado, preservação de comunidades aquáticas, recreação de contato primário (ex. natação) e proteção de ecossistemas aquáticos;
- b) **Classe 1:** Águas destinadas ao abastecimento público após tratamento convencional, proteção de comunidades aquáticas, recreação de contato primário, irrigação de hortaliças e plantas frutíferas, e proteção de espécies aquáticas;
- c) **Classe 2:** Águas destinadas ao abastecimento público após tratamento convencional, recreação de contato secundário, irrigação de culturas menos sensíveis, e dessedentação de animais;
- d) **Classe 3:** Águas destinadas ao abastecimento público após tratamento avançado, recreação de contato secundário, irrigação de culturas arbóreas e forrageiras, dessedentação de animais, e uso industrial;
- e) **Classe 4:** Águas destinadas à navegação e harmonia paisagística.

Figura 1 - Relação entre as classes de enquadramento com o uso da água.

USOS DAS ÁGUAS DOCES		CLASSES DE ENQUADRAMENTO				
		ESPECIAL	1	2	3	4
Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas		Classe mandatória em Unidades de Conservação de Proteção Integral				
Proteção das comunidades aquáticas			Classe mandatória em Terras Indígenas			
Recreação de contato primário						
Aquicultura						
Abastecimento para consumo humano		Após desinfecção	Após tratamento simplificado	Após tratamento convencional	Após tratamento convencional ou avançado	
Recreação de contato secundário						
Pesca						
Irrigação			Hortalças consumidas cruas e frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película	Hortalças, frutíferas, parques, jardins, campos de esporte e lazer,	Culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras	
Dessedentação de animais						
Navegação						
Harmonia paisagística						

Fonte: Associação Nacional de Águas, 2024.

3.3 Parâmetros de Qualidade da Água para o Consumo Humano

Os parâmetros de qualidade da água para o consumo humano são essenciais para garantir a segurança e a potabilidade da água distribuída à população. A Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, estabelece os Valores Máximos Permitidos (VMP) para uma ampla gama de substâncias e características, incluindo parâmetros microbiológicos, químicos e organolépticos. Esses VMP são definidos com base em estudos científicos e considerações de saúde pública, visando prevenir riscos à saúde associados à ingestão de água contaminada.

Alguns dos parâmetros e seus VMP presentes no padrão de potabilidade do Ministério da Saúde estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1- Valores Máximos Permitidos		
Parâmetro	Valor máximo permitido	Unidade
Cor Aparente	15	uH
Turbidez	5	uT
pH	6,5 – 9,0	-
Cloreto	250	mg/L
Dureza total	300	mg/L

Fonte: Adaptado de Portaria nº 888, 2021.

A seguir, são apresentadas considerações sobre os parâmetros organolépticos e bacteriológicos analisados neste estudo.

Cor: A cor da água é determinada pela presença de substâncias dissolvidas, como produtos da decomposição de matéria orgânica, substâncias húmicas, ferro, manganês ou efluentes industriais (BRASIL, 2006). A cor pode ser classificada como verdadeira, quando é determinada em amostras sem turbidez após a remoção de partículas por centrifugação ou filtração; e cor aparente ou real, que é medida em amostras sem remoção de partículas, incluindo material coloidal ou em suspensão (XAVIER et al., 2022). Embora seja um parâmetro estético e de aceitação para consumo, a cor pode indicar a presença de precursores de trihalometanos, subprodutos tóxicos da cloração, e interferir na manutenção do cloro residual no sistema de distribuição.

Potencial Hidrogeniônico (pH): O pH é um parâmetro fundamental na avaliação da qualidade da água, representando a concentração de íons hidrogênio (H^+) presentes em solução. Esse parâmetro é essencial para determinar se a água possui características ácidas, neutras ou alcalinas. No tratamento da água, o controle do pH é crucial, especialmente nos processos de coagulação e desinfecção, uma vez que o desempenho e a eficácia dessas etapas estão intimamente ligados a um pH adequado (SCHORR, 2022). O pH ideal para o tratamento da água é geralmente entre 6,0 e 9,5, conforme a Portaria MS nº 518/2004.

Turbidez: A turbidez da água é uma medida da quantidade de partículas em suspensão que afetam a passagem de luz, refletindo a transparência do líquido. É causada por partículas coloidais, matéria orgânica e inorgânica, e organismos microscópicos. De acordo com a Portaria GM/MS nº 888, níveis elevados de turbidez podem indicar a presença de contaminantes e reduzir potencialmente a eficácia dos processos de desinfecção. A turbidez da água de mananciais superficiais varia sazonalmente entre períodos de chuva e estiagem, o que demanda atenção na operação das estações de tratamento (BRASIL, 2006).

O padrão de turbidez da água, tanto antes da desinfecção quanto após a filtração, é um componente essencial do padrão microbiológico de potabilidade da água, conforme evidenciado na Tabela 2.

Tabela 2 - Padrões de Turbidez para água pós-desinfecção ou pós-filtração

Tratamento da água	VMP
Filtração rápida	0,5uT em 95% das amostras 1,0 uT no restante das amostras mensais coletadas
Filtração em membrana	0,1 uT em 99% das amostras
Filtração lenta	1,0 uT em 95% das amostras 2,0 uT no restante das amostras mensais coletadas
Pós-desinfecção (águas subterrâneas)	1,0 uT (2) em 95% das amostras 5,0 uT no restante das amostras mensais coletadas

Fonte: Adaptado de Portaria nº 888, 2021.

Oxigênio dissolvido (OD): Esse parâmetro é essencial para a sobrevivência de organismos aquáticos, pois a maioria depende do oxigênio para a respiração. Em particular, os peixes são altamente sensíveis a variações de OD e geralmente não sobrevivem em águas com concentrações inferiores a 4,0 mg/L (PARRON et al., 2011). A insuficiência de oxigênio dissolvido pode levar a condições de hipóxia (baixa concentração de oxigênio) ou até anoxia, resultando em impactos negativos sobre os ecossistemas aquáticos e comprometendo a qualidade da água para consumo humano e outros fins.

Condutividade: A condutividade elétrica da água é uma medida da sua capacidade de conduzir corrente elétrica, que é diretamente proporcional à concentração de íons dissolvidos na água. Altos níveis de condutividade elétrica geralmente indicam uma maior presença de íons e, portanto, uma maior degradação de matéria orgânica e possível poluição, enquanto valores baixos estão associados a menor concentração de íons e baixa decomposição. A condutividade elétrica é, portanto, um indicador indireto da presença de poluentes (MONTOVANI, 2021).

Coliformes totais/*Escherichia coli*: Os coliformes totais estão associados à decomposição de matéria orgânica e podem ocorrer naturalmente no solo, água e plantas. Sua principal aplicação é na avaliação da qualidade da água tratada, onde sua presença pode indicar falhas no tratamento, contaminação pós-tratamento ou excesso de nutrientes. O grupo abrange cerca de 30 espécies, incluindo tanto bactérias provenientes do trato gastrointestinal de humanos e outros animais homeotérmicos, quanto espécies de bactérias não entéricas (LORETO, 2014).

A espécie *Escherichia coli* (*E. coli*) é uma bactéria do grupo coliforme, e é utilizada para monitorar a qualidade microbiológica da água destinada ao consumo humano, já que a presença desse microrganismo indica contaminação fecal. Embora faça parte da flora intestinal de humanos e animais sem causar danos, algumas variações patogênicas podem provocar infecções graves, como diarreias agudas, infecções urinárias e bacterianas (GURGEL et al., 2020). As normas estabelecidas para o controle bacteriológico estão dispostas na Tabela 3.

Tabela 3 - Padrões bacteriológicos

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

Fonte: Adaptado de Portaria nº 888, 2021.

3.4 Processos de Tratamento da água

O principal objetivo do tratamento de água para consumo humano é torná-la potável e segura, removendo patógenos, substâncias químicas nocivas e eliminando turbidez, cor, gosto e odor (BRASIL, 2006). De acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005 o tratamento convencional da água compreende uma série de etapas físicas e químicas que inclui coagulação, floculação, desinfecção e correção de pH (ALBUQUERQUE, 2020).

3.4.1 Pré-oxidação

Em alguns sistemas de abastecimento, é necessário realizar um pré-tratamento antes da aplicação do coagulante, utilizando técnicas como filtração, pré-sedimentação, pré-oxidação e/ou pré-alkalinização. A pré-oxidação oferece diversos benefícios, como a remoção de cor, controle de sabor e odor, redução de poluentes orgânicos específicos, precipitação de metais, diminuição da dosagem de coagulante e aprimoramento do processo de coagulação (CARDOSO, 2009).

O mecanismo da pré-oxidação envolve reações de oxidação que alteram a estrutura de compostos orgânicos e inorgânicos presentes na água bruta. O principal objetivo é modificar o

estado de oxidação desses compostos, facilitando sua remoção nos estágios subsequentes de coagulação, floculação e filtração. (ELDER & BUDD, 2011).

Os principais agentes oxidantes utilizados incluem cloro, dióxido de cloro, ozônio, permanganato de potássio e peróxido de hidrogênio (BUENO, 2005). A escolha do oxidante mais adequado depende de diversos fatores, como a natureza dos compostos orgânicos presentes na água, a concentração do oxidante, e as condições ambientais, como pH, temperatura e presença de outras substâncias que possam interferir no processo (WIECHETECK, 2005).

No Brasil, o cloro destaca-se como o agente oxidante mais empregado nos processos de pré-oxidação, devido ao seu baixo custo, facilidade de manuseio e alto potencial oxidante. Reagentes clorados, como hipoclorito de sódio (NaClO), hipoclorito de cálcio [$\text{Ca}(\text{ClO})_2$] e cloro gasoso (Cl_2), são eficazes na remoção de cor, ferro e manganês, além de reduzirem sabor e odor indesejáveis (ROSALÉM et al., 2013).

3.4.2 Coagulação

O processo de coagulação consiste na alteração físico-química de partículas coloidais, caracterizada pela cor e turbidez, produzindo partículas que possam ser removidas em seguida por um processo físico de separação (DAVIS, 2010). É um componente essencial de sistemas convencionais de tratamento de água nos quais os processos de coagulação, sedimentação, filtração e desinfecção são combinadas para clarificar a água e remover e inativar contaminantes microbiológicos (EDWARD, 2010).

A coagulação envolve a adição de coagulantes com a finalidade de desestabilizar as suspensões coloidais de partículas sólidas, reduzindo, assim, as forças de repulsão que mantêm separadas as partículas em suspensão (OLLER, I. et al., 2011). Os coagulantes aplicados podem ser sais de metais inorgânicos, tais como sulfato de alumínio, aluminato de sódio, sulfato de férrico e cloreto férrico.

O processo de coagulação é composto por três etapas sequenciais: formação do coagulante, desestabilização das partículas e colisões interpartículas. A formação do coagulante, a desestabilização das partículas e a interação entre o coagulante e a matéria orgânica natural (MON) ocorrem naturalmente durante e após a adição química na fase de mistura rápida. As colisões de partículas, que levam à formação de agregados ou flocos, começam na mistura rápida, mas ocorrem predominantemente durante o processo de floculação (EDWARD, 2010).

A coagulação possui várias vantagens, incluindo economia de custos, operação fácil e bom desempenho, visto que esse procedimento pode remover com eficiência a maioria das partículas coloidais suspensas e parte de vários contaminantes dissolvidos de corpos d'água. (LIU, Zhou et al., 2019). A eficiência do processo depende das características do líquido a ser tratado, do pH de coagulação, do tipo e dosagem do coagulante utilizado, e do gradiente de velocidade da mistura (RICHTER, 2009).

3.4.3 Filtração

A filtração é um processo unitário determinante no tratamento da água, sendo geralmente o último passo na remoção de impurezas em uma estação de tratamento de água (ETA). Este processo combina filtração, sedimentação e contato interfacial para remover sólidos suspensos ou flocos, transferindo-os para materiais granulares como areia ou carvão.

Durante a filtração, a água escoar por um meio poroso, geralmente de forma descendente, eliminando partículas, colóides e microrganismos não removidos na clarificação (SHAMMAS; WANG, 2016). Materiais comuns em filtros de leito granular incluem areia, carvão, antracito e garnet, podendo ser usados sozinhos ou em combinações de duas ou três camadas. As propriedades desses materiais, como tamanho, formato, densidade e dureza, são fundamentais para determinar a eficiência da filtração (BRINCK, 2009).

Durante o processo de filtração, três mecanismos principais atuam na remoção de compostos presentes na água: transporte, aderência e desprendimento. A eficácia desses mecanismos é influenciada por vários fatores, incluindo as características físicas e químicas das partículas e da água, as propriedades do meio filtrante, a taxa de filtração e o método de operação dos filtros (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Usualmente, os filtros são classificados em lentos e rápidos, com base na taxa de operação e no método de limpeza (RICHTER, 2009). De acordo com a NBR 12.216 (ABNT, 1992), os filtros lentos são empregados no tratamento de águas subterrâneas ou superficiais de bacias não protegidas, enquanto os filtros rápidos são utilizados quando a água já foi clarificada ou quando é possível remover as partículas que causariam turbidez indesejada sem a necessidade de coagulação.

A maioria dos filtros opera por um período limitado e, à medida que a perda de carga aumenta ou a turbidez da água filtrada ultrapassa o limite aceitável, a operação de filtração deve ser interrompida, e os filtros devem ser lavados. As impurezas retidas nos filtros são removidas periodicamente por meio da retrolavagem com água, realizada em intervalos de horas a dias,

dependendo das características do filtro e da operação da estação de tratamento (RAMIREZ, 2010; SAUL, 2023).

3.4.4 Adsorção

A adsorção é uma operação unitária de transferência de massa do tipo sólido-fluido, na qual componentes presentes na fase fluida são removidos e transferidos para a superfície de uma fase sólida, devido as forças de atração entre ambas (McCabe, 2005). O material sólido que adsorve é chamado de adsorvente, enquanto as moléculas adsorvidas na interface são denominadas adsorvatos (FUKUMOTO, 2020).

A adsorção pode ser de natureza física ou química. A adsorção física ocorre por forças de Van der Waals, sem que haja quebra ou formação de ligações, mantendo inalterada a natureza química do adsorvato. Na adsorção química, o adsorvato é fixado por uma força de atração maior, por meio de interações covalentes ou iônicas, e, em muitos casos, a adsorção é irreversível (FUKUMOTO, 2020).

A escolha do adsorvente ideal é crucial para a eficácia do processo de adsorção, já que apenas alguns materiais possuem as características necessárias para uso prático, como poros acessíveis e seletividade entre adsorvente e adsorvato. As características mais desejadas em adsorventes incluem alta capacidade de adsorção, grande área superficial, seletividade, cinética favorável, resistência mecânica, baixo custo, e estabilidade térmica e química (PETRICIOLET et al., 2017).

A adsorção com carvão ativado é amplamente utilizada pelas estações de tratamento de água (ETAs), devido à sua alta eficiência de remoção, baixo custo e capacidade de regeneração. Com uma elevada área superficial porosa, o carvão ativado remove substâncias que causam gosto, odor, cor e fenóis, e é eficaz tanto para poluentes gasosos quanto líquidos. Além disso, após o uso, o material pode ser regenerado por diversos métodos, como tratamento térmico, vapor, solventes, ácidos, bases ou oxidação química, permitindo a recuperação de sua capacidade adsorvente (BONATTO, 2013).

3.4.5 Desinfecção

O processo de desinfecção da água é uma etapa essencial para garantir sua potabilidade, tendo como objetivo a eliminação ou inativação de microrganismos patogênicos, por intermédio de agentes físicos e/ou químicos. Dentre os mecanismos químicos destacam-se oxidantes como

cloro, dióxido de cloro, ozônio e radiação ultravioleta (UV) (GHERNAOUT, 2020). Em seu artigo 24, a Portaria nº 888/2021 estabelece que:

Toda água destinada ao consumo humano que seja fornecida coletivamente deve passar por um processo de desinfecção ou receber a adição de desinfetante para garantir a manutenção dos resíduos mínimos (Portaria nº 888 2021).

A eficácia da desinfecção é avaliada pela concentração residual do desinfetante e tempo de contato necessário para inativar os patógenos. Além disso, fatores como a qualidade da água antes da desinfecção, temperatura e pH desempenham um papel significativo na eficiência do processo (SHAMMAS; WANG, 2016).

3.4.5.1 Ozonização

A ozonização é utilizada no tratamento de água há mais de um século, inicialmente para desinfecção e, posteriormente, para oxidação de poluentes inorgânicos e orgânicos. Nos últimos anos, seu uso tem crescido significativamente em processos avançados de tratamento de águas residuais e no reuso de água potável.

O ozônio, um gás altamente instável, emite um odor desagradável e característico à temperatura ambiente. Sua meia-vida é relativamente curta, variando de 20 a 40 minutos, o que resulta em uma rápida decomposição em ambientes externos. O ozônio se destaca por seu alto potencial de oxidação, que é 50% mais forte e 3.000 vezes mais rápido que o do cloro, tornando-o uma opção altamente eficaz para garantir a qualidade da água (LIM et al., 2022; DOREVITCH et al., 2020; CAVALHEIRO, 2023).

Tabela 4 - Potencial de oxidação de compostos oxidantes

Oxidante	Potencial máximo de oxidação (V)
Radical hidroxila (OH·)	2,80
Ozônio (O ₃)	2,07
Hipoclorito (ClO ⁻)	1,43
Cloro (Cl ₂)	1,36

Fonte: adaptado de Nolasco, 2009.

Grassi e Jardim (1993) mencionam que a técnica mais comum para gerar ozônio é a descarga em plasma, onde o ozônio é formado a partir da decomposição do oxigênio molecular, seguida pela combinação de um átomo do radical oxigênio com uma molécula de oxigênio.



Em pH básico, o ozônio se decompõe formando radicais hidroxila ($\cdot\text{OH}$), conforme o encadeamento descrito nas reações 3 a 6, que possuem um potencial de redução ainda maior ($E^\circ = 2,80 \text{ V}$). Dessa forma, a oxidação de compostos orgânicos pode ocorrer por duas vias: diretamente pelo ozônio molecular, predominante em meio ácido (ozonólise), ou indiretamente pelos radicais hidroxila, predominante em meio básico. Em pH neutro, ambos os oxidantes podem atuar simultaneamente na inativação de vírus, protozoários e bactérias resistentes (SOUZA, 2016; MAHMOUND & FREIRE, 2007).



A eficácia da ozonização depende da introdução do ozônio na água, ou seja, do contato entre as fases líquida e gasosa para que ocorra a transferência de massa. Além da quantidade de ozônio disponível, o tempo de contato entre o microrganismo e o agente oxidante também é crucial para a desinfecção (YAMEI CAI et al. 2023).

A Portaria GM/MS Nº 888/21, em seu artigo 31, recomenda um valor de concentração e tempo de contato ($C \cdot t$) de 0,34 mg.min/L para uma temperatura média mensal da água de 15°C em sistemas coletivos com captação em mananciais superficiais.

4 METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado em colaboração com o projeto de extensão: PJ616-2023: Monitoramento da qualidade da água das microbacias presentes no município de João Pessoa, desenvolvido no Laboratório de Cromatografia e Quimiometria Aplicada (LACQUA), em parceria com a Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMAM), da Prefeitura Municipal de João Pessoa.

4.1 Caracterização da área de estudo

Com base em estudos da Diretoria de Estudos e Pesquisas Ambientais (DIEP) da Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEMAM), foram identificados pontos críticos de amostragem em João Pessoa, localizados em áreas com condições ambientais desfavoráveis e baixa qualidade da água corrente. Um desses pontos foi definido na bacia hidrográfica do Rio Paraíba, dada sua relevância econômica e cultural para o estado.

A bacia do Rio Paraíba (Figura 2) abrange a região centro-sul da Paraíba, incluindo cidades importantes como João Pessoa e Campina Grande. Suas coordenadas geográficas vão de 6°51'31" a 8°26'21" de latitude e de 34°48'35" a 37°2'15" de longitude, com um percurso de cerca de 20.071,83 km². O rio nasce na Serra de Jabitacá, em Monteiro (Paraíba), e deságua no Atlântico entre os municípios de Cabedelo e Lucena.

Figura 2 - Bacia hidrográfica do rio Paraíba



Fonte: AESA, 2016.

Por meio de ações dos governos federal e estadual, diversos açudes públicos foram construídos na área da bacia hidrográfica do rio Paraíba, servindo ao abastecimento de populações e rebanhos, além de serem utilizados para irrigação, pesca, e algumas atividades de lazer e turismo regional. Esses reservatórios representam as principais fontes de água da região, o que levou à criação do Comitê da Bacia Hidrográfica do rio Paraíba, órgão responsável por coordenar as ações de gestão e monitorar a qualidade da água.

4.1.1 Definição do ponto de coleta

Entre os pontos de coleta analisados no projeto de extensão, mais de 10 pontos, no total, foi definido como objeto de estudo para este trabalho o **rio Mandacaru**, com enquadramento na classe 3 e localização dentro da bacia hidrográfica do rio Paraíba, no bairro dos Ipês, em João Pessoa, conforme apresentado na Figura 3.



Fonte: autora, 2024.

Esta área é fortemente urbanizada, com diversas habitações nas proximidades. A vegetação local inclui manguezais, sendo notável a presença de resíduos sólidos e o excesso de lodo nas margens. A água do rio Mandacaru possui profundidade média a alta, com vazão variando de moderada a forte, além de apresentar espuma na superfície, mau odor e uma largura estimada entre 15 e 20 metros. A Figura 4 ilustra o ponto de coleta das amostras para as análises de caracterização e estudos de tratamento da água. As coletas foram realizadas no mês de setembro, um período de seca, caracterizada por níveis baixos de água no rio.

Figura 4 - Local e coleta



Fonte: autora, 2024.

4.2 Testes em Jar test

Após a coleta e análise da água bruta, constatou-se a necessidade de um pré-tratamento, devido aos elevados valores de cor verdadeira e turbidez. Sendo assim, para melhorar a remoção desses parâmetros e aumentar a eficácia das etapas subsequentes do tratamento, foi implementado um processo que envolve as fases de pré-oxidação, coagulação, floculação e decantação.

Para determinar a dosagem ideal de oxidante e coagulante, foram realizados ensaios de Jar-Test utilizando amostras de água bruta do rio em análise. O procedimento foi dividido em três etapas principais: inicialmente, o oxidante foi adicionado à água bruta, permanecendo sob agitação por 10 minutos; em seguida, o pH foi ajustado para a faixa entre 6,5 e 7,0 mediante adição de HCl a 1%. Na última etapa, foi adicionado o coagulante, com agitação rápida por 2 minutos, seguida de uma fase de agitação lenta por 10 minutos para favorecer a formação dos flocos. Finalmente, as soluções foram mantidas em repouso por 30 minutos para decantação dos sólidos formados.

Como parâmetros de eficiência do tratamento, foram analisadas a cor aparente, a cor verdadeira e a turbidez da água. O percentual de remoção desses parâmetros foi calculado utilizando a equação 1.

$$remoção (\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

Onde C_i e C_f correspondem aos valores iniciais (antes do tratamento) e finais (após o tratamento) de cada parâmetro.

4.2.1 Definição do oxidante

Devido a larga aplicação em estações de tratamento de água no Brasil, foram avaliados os efeitos da oxidação com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e hipoclorito de sódio ($NaClO$). Ambas as soluções iniciais foram preparadas na concentração de 10g/L. Durante os testes, as concentrações dos oxidantes foram ajustadas para 2 mg/L, 3,8 mg/L e 5 mg/L, enquanto a concentração do coagulante ($Al_2(SO_4)_3$) foi mantida constante em 20 mg/L.

4.2.2 Determinação da concentração do Coagulante

Após a avaliação e determinação do oxidante de maior eficiência, foram realizados ensaios para determinação da dosagem de coagulante. Os experimentos foram realizados variando a concentração do $Al_2(SO_4)_3$ em 20, 30, 40, 50, 60 e 80 mg/L e fixando a concentração do oxidante em 3,8 mg/L.

Tabela 5 – Concentrações de coagulante e oxidante

Jarro	$[Al_2(SO_4)_3]$ (mg/L)	[Oxidante] (mg/L)
1	20	3,8
2	30	3,8
3	40	3,8
4	50	3,8
5	60	3,8
6	80	3,8

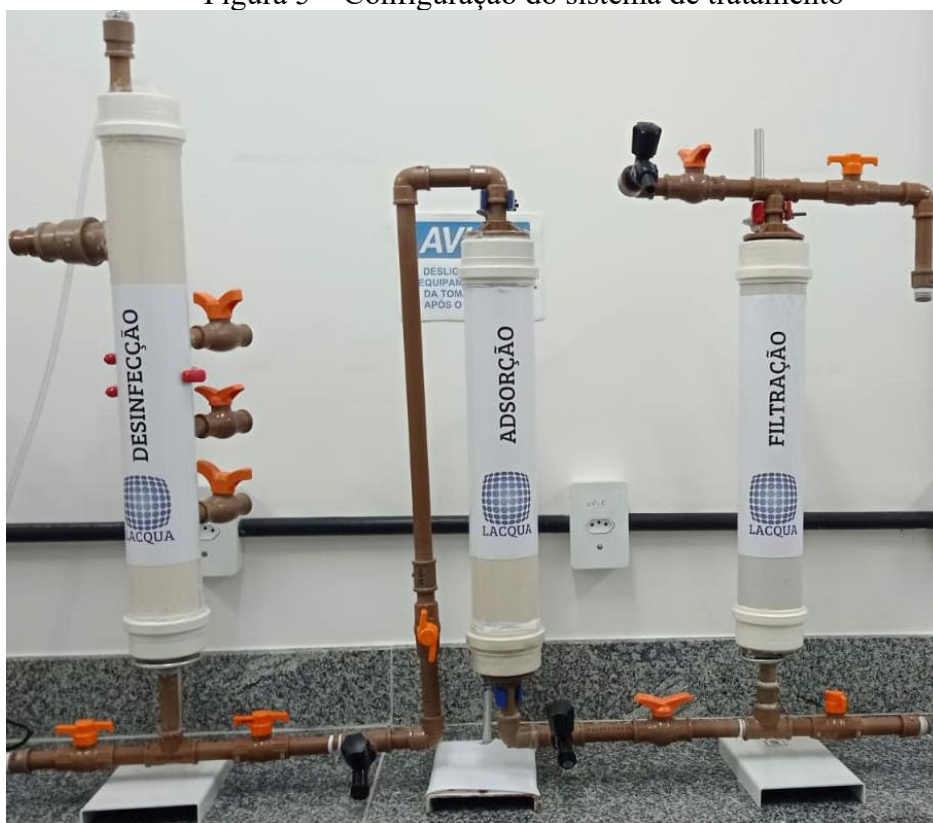
Fonte: autora, 2024.

4.3 Sistema de tratamento

O sistema de tratamento de água foi projetado e montado com três torres verticais de PVC, conectadas em série, cada uma desempenhando uma função específica no processo. A primeira torre foi destinada à filtração, a segunda à adsorção, e a terceira ficou responsável pela absorção de ozônio durante a etapa de desinfecção. A estrutura do sistema de tratamento e os materiais utilizados podem ser observados na Figura 5 e na Tabela 6.

Além disso, o sistema contava com um reservatório de 20 litros para armazenar a água bruta, que foi bombeada para as torres utilizando uma bomba submersa, com capacidade máxima de 900 L/h, garantindo o fluxo contínuo da água para todo sistema. O fluxograma do processo está ilustrado na Figura 6.

Figura 5 – Configuração do sistema de tratamento



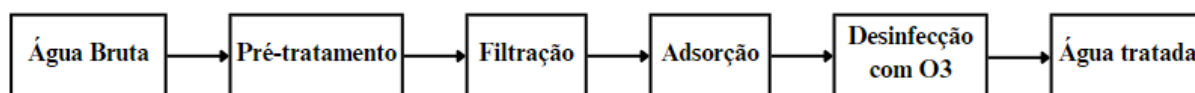
Fonte: autora, 2024.

Tabela 6 - Materiais utilizados no sistema

Materiais Utilizados	Quantidade
Tubo de água de 75 mm	3
Tubo de água de 20 mm	2
Tudo de água de 40mm	1
Cap soldável PVC de 75 mm	6
Adaptador soldável	4
Bucha redução soldável	1
Joelho de 20 mm	6
Tê de 20 mm	3
Registro de 20mm	7
Torneira	3
Mangueira	1
Bomba submersa	1
Reservatório de 20L	1

Fonte: autora, 2024.

Figura 6 - Fluxograma do processo



Fonte: autora, 2024.

4.3.1 Pré-tratamento

O pré-tratamento, de 20 litros da água bruta, foi iniciado pela etapa de pré-oxidação, seguida pelos processos de coagulação, floculação e decantação. As concentrações de oxidante e coagulante foram definidas com base nos resultados de eficiência máxima obtidos previamente em ensaios de Jar Test. A metodologia seguiu os mesmos procedimentos dos ensaios de Jar Test, garantindo a padronização das condições experimentais. O pré-tratamento foi conduzido diretamente em um reservatório de 20 L, utilizando um agitador mecânico (Figura 7), para garantir uma mistura eficiente e homogênea durante a aplicação dos reagentes.

Figura 7 - Sistema de pré-tratamento



Fonte: autora, 2024.

4.3.2 Sistema de filtração

O sistema de filtração utilizado neste estudo foi construído em uma torre de PVC com 75 mm de diâmetro interno e 48 cm de altura. O meio filtrante foi composto por areia fina, e a

camada suporte por quatro camada de materiais com granulometrias diferentes, servindo de sustentação ao meio filtrante, além de facilitarem o fluxo de água e evitarem o arraste de partículas finas para a saída do sistema.

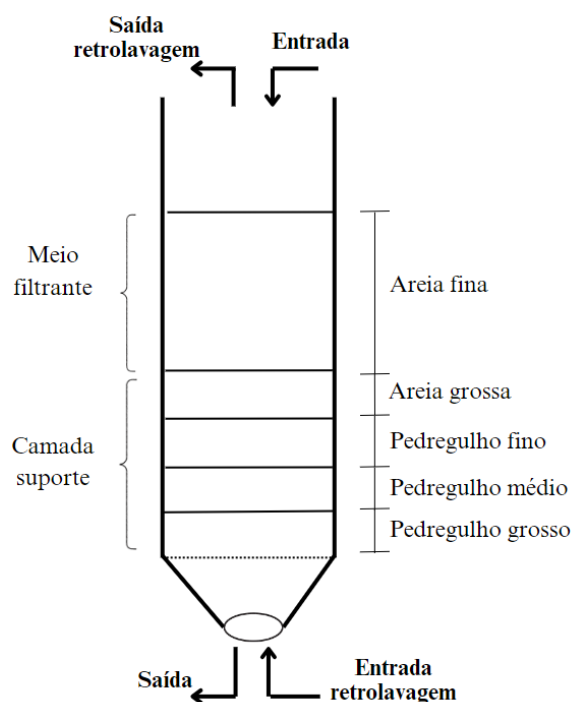
A configuração do filtro foi projetada para operação em regime de filtração descendente. Para garantir a manutenção eficiente do sistema, foram instaladas as configurações adequadas para a realização de retrolavagem ascendente.

Tabela 7 - Características do meio filtrante e da camada suporte

Tipo de camada		Espessura da camada
Meio filtrante	Areia fina	20 cm
	Areia grossa	1 cm
Camada suporte	Pedregulho fino	2 cm
	Pedregulho médio	1,3 cm
	Pedregulho grosso	1,6 cm

Fonte: autora, 2024.

Figura 8 - Esquema do filtro de areia



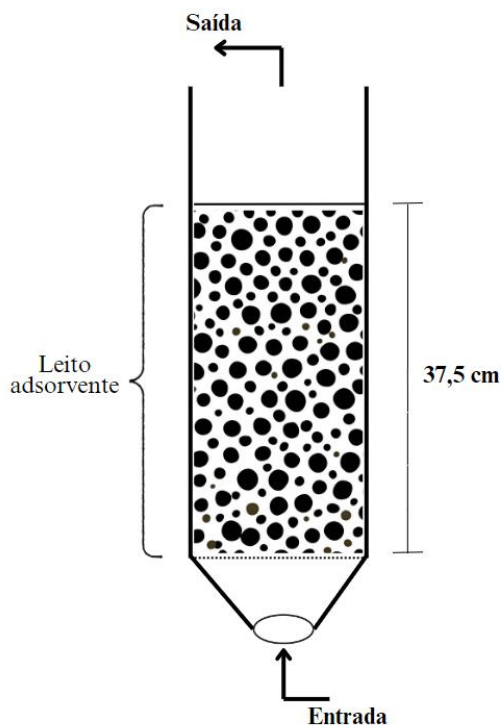
Fonte: autora, 2024.

4.3.3 Sistema de adsorção

O sistema de adsorção foi desenvolvido utilizando uma coluna de PVC com 48 cm de altura e 75 mm de diâmetro. O leito adsorvente foi preenchido com carvão ativado granular (CAG), e a espessura da camada foi calculada considerando a relação entre a altura útil do leito (L) e o diâmetro interno da coluna (D), utilizando a proporção L/D. Adotou-se uma proporção

de $L/D = 5$, resultando em uma camada de CAG de 37,5 cm, garantindo assim um tempo de contato adequado para maximizar a eficiência do processo de adsorção.

Figura 9 - Esquema da coluna de adsorção



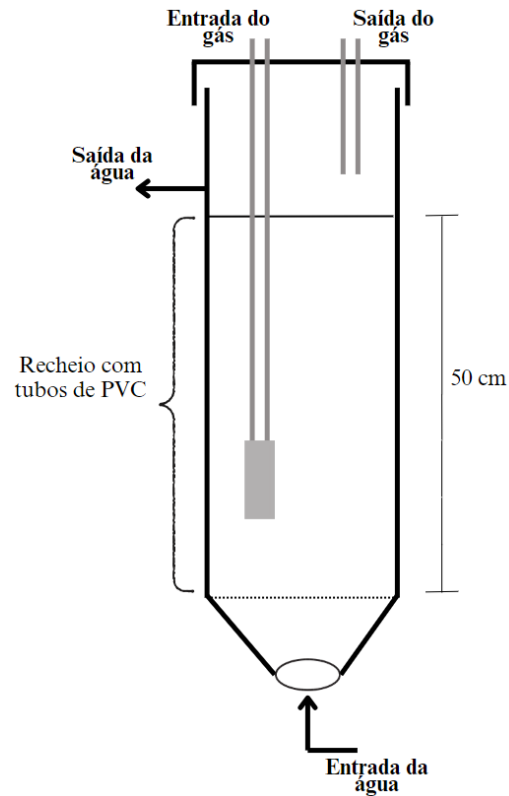
Fonte: autora, 2024.

4.3.4 Sistema de desinfecção por ozônio

O sistema de ozonização foi composto por um gerador de ozônio modelo O&L 3.0 RM (Ozone & Life), com capacidade de gerar concentrações de ozônio entre 0 e 70 $\mu\text{g/mL}$ e fluxo de 250 mL/min, alimentado por um cilindro de oxigênio. A coluna de ozonização, confeccionada em tubo de PVC, possui 60 cm de altura e 75 mm de diâmetro interno. Tampas de PVC flangeadas foram utilizadas na base e no topo da coluna, vedadas por anéis de borracha para garantir o isolamento.

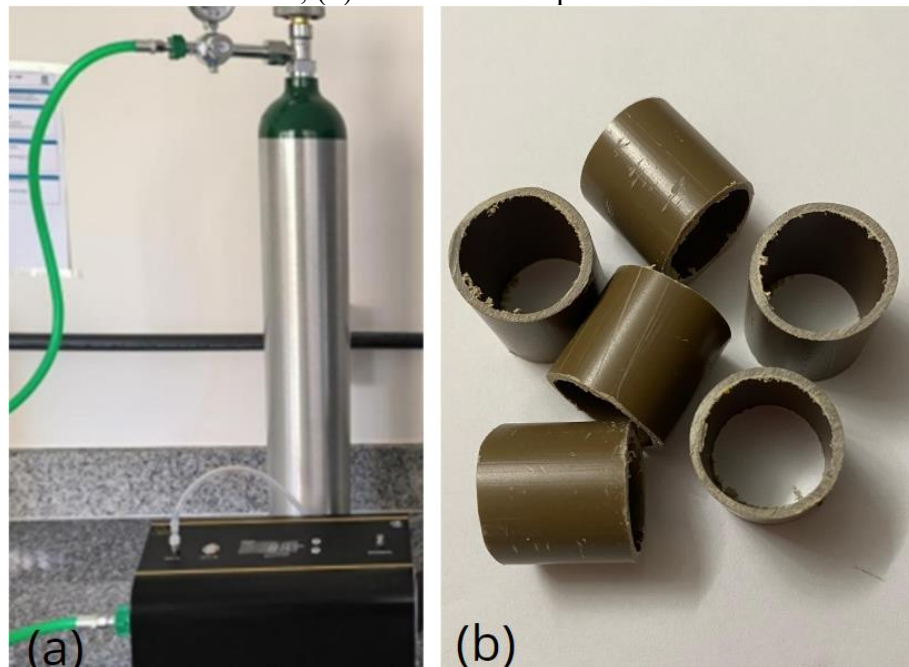
Na parte superior da coluna, foram adicionadas duas conexões: uma destinada à entrada de ozônio, realizada por meio de uma mangueira de silicone conectada a uma pedra porosa, e outra para a saída do gás não absorvido. O interior da coluna foi preenchido com pequenos tubos de PVC, cortados manualmente, com diâmetro de 20 mm e comprimento de 2 cm. O objetivo deste material é que atue como um recheio na coluna de absorção aumentando a área de contato entre o líquido e o gás, e melhorando a eficiência na transferência de massa (absorção do ozônio da fase gasosa para a fase líquida).

Figura 10 – Esquema da coluna de desinfecção



Fonte: autora, 2024.

Figura 11 – Equipamentos utilizados na desinfecção: (a) Cilindro de oxigênio e gerador de ozônio; (b) Tubos de PVC para recheio



Fonte: autora, 2024.

4.4 Coleta e análises das amostras

Foram coletadas amostras de água bruta e após cada etapa do tratamento para análises posteriores, avaliando-se alguns parâmetros de qualidade. Esses parâmetros incluíram indicadores físico-químicos e microbiológicos, possibilitando uma avaliação detalhada da eficiência de cada fase do processo de tratamento.

4.4.1 Análises físico-químicas

Os métodos utilizados para as análises físico-química estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Metodologia aplicada nas análises físico-químicas

Parâmetro	Unidade	Referência metodológica
Cor aparente	mg Pt/L	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23 ^a ed., 2120 B.
Cor verdadeira	mg Pt/L	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23 ^a ed., 2120B.
Turbidez	uT	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23 ^a ed., 2130B.
pH	-	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20 ^a ed., 4500H.
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	mg O ₂ /L	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22 ^a ed., 5210B.
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mg O ₂ /L	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22 ^a ed., 5220B.
Oxigênio Dissolvido	mg/L	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22 ^a ed., 4500G.
Condutividade	µs/cm	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20 ^a ed., 2510B.
Sólidos Totais	mg/L	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23 ^a ed., 2540 ^a .

Fonte: autora, 2024.

4.4.2 Análises Microbiológicas

Para a quantificação microbiológica de Coliformes Totais (CT) e *Escherichia coli* (*E. coli*), foi aplicada a técnica de filtração por membrana. A uma amostra de 100 mL de água foi adicionada uma quantidade adequada de tiosulfato de sódio (Na₂S₂O₃) para neutralização de possíveis desinfetantes. Em seguida, a amostra foi filtrada a vácuo utilizando uma membrana de acetato de celulose (Colipaper PETRI) com porosidade de 0,45 µm.

Após a filtração, a membrana foi transferida para o meio de cultivo e incubada em estufa a 36°C por 18 horas. A identificação das colônias foi realizada visualmente: colônias vermelhas

foram contabilizadas como Coliformes Totais, enquanto as colônias azuis foram classificadas como *E. coli*. Os resultados foram expressos em unidades formadoras de colônia (UFC) por 100 mL de amostra.

4.4.2.1 Inativação microbiana

A eficiência microbiológica do sistema de tratamento será quantificada em escala logarítmica, conforme estipulado pela Portaria GM/MS nº 888/2021. O foco será a inativação de coliformes totais e *Escherichia coli*, que são os indicadores de contaminação avaliados nesse estudo. Para calcular a inativação microbiana, será utilizada a seguinte equação logarítmica, que mede a redução de microrganismos:

$$Inativação = \log \frac{N_0}{N} \quad (2)$$

Onde N_0 representa a contagem inicial de colônias na água bruta, e N a contagem de microrganismos após o tratamento.

4.5 Quantificação do ozônio em água limpa

A quantificação do ozônio em água limpa (destilada ou potável), foi realizada a fim de avaliar a saturação da água, no sistema desenvolvido, com o ozônio. A análise foi realizada por meio da leitura da absorbância em espectrofotômetro UV-VIS, utilizando cubetas de quartzo com caminho ótico de 1 cm. O experimento utilizou água de abastecimento e avaliou a saturação do gás com emissões de 10, 20, 30, 40 e 50 µg/mL. O ozônio foi injetado durante 25 minutos, com coleta de amostras a cada 2 minutos para leitura no espectrofotômetro, a um comprimento de onda de 254 nm. A concentração de ozônio dissolvido na água foi calculada aplicando a Lei de Beer-Lambert:

$$A = \varepsilon \cdot l \cdot c \quad (3)$$

Onde A é a absorbância, ε a absorvidade molar do ozônio em 254 nm ($3024 \text{ M}^{-1}\text{cm}^{-1}$), l o caminho ótico, e c a concentração de ozônio (Langlais et al., 1991).

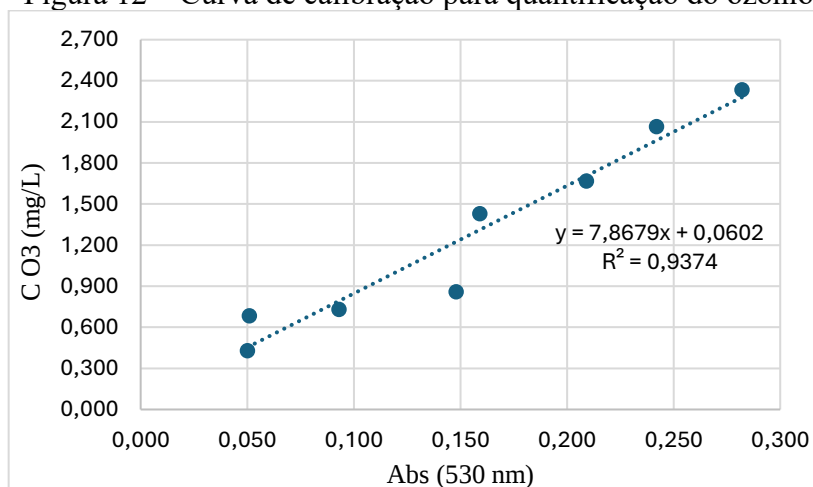
4.6 Quantificação do ozônio em água contaminada - Curva analítica com o método DPD

A quantificação da concentração de ozônio na água, em amostras de água contaminada, foi realizada utilizando o método colorimétrico DPD (N, N-dietil-p-fenilenodiamina). Nesse

processo, o ozônio reage com o reagente DPD na presença de iodeto de potássio, gerando uma solução de coloração rosa, cuja intensidade é proporcional à concentração de ozônio na amostra.

Para a construção da curva analítica, foram preparadas soluções padrão com concentrações conhecidas de ozônio, às quais foi adicionado o reagente DPD, e imediatamente analisadas em espectrofotômetro a 530 nm. A partir dos valores de absorbância encontrados, foi possível construir uma curva de calibração, na qual o eixo x representa a absorbância e o eixo y, a concentração de ozônio em mg/L. A Figura 12 apresenta a curva obtida.

Figura 12 – Curva de calibração para quantificação do ozônio



Fonte: autora, 2024.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização da água em estudo

As características da água bruta utilizada neste estudo estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Características da água de estudo

Parâmetro	Resultado	Unidade	VMP (Classe 3)
Temperatura	26,7	°C	-
pH	7,13	-	6,0 - 9,0
Oxigênio Dissolvido	3,65	mg/L	≥ 4,0
Condutividade	29,56	µs /cm	-
Salinidade	17,14	ppt	-
Sólidos Totais	520	mg/L	500
Cor aparente	380,53	mg Pt/L	-
Cor verdadeira	231,88	mg Pt/L	75
Turbidez	63,29	uT	100
Coliformes Totais	1,27 x 10 ⁴	UFC/100mL	-
<i>E. coli</i>	1,17 x 10 ⁴	UFC/100mL	-
DBO	1,81	mg O ₂ /L	10
DQO	558	mg O ₂ /L	-

Fonte: autora, 2024.

A análise comparativa revela que a qualidade da água do rio apresenta várias inconformidades em relação aos padrões estabelecidos para águas doces de Classe 3, conforme a Resolução CONAMA 357/2005. Apesar de alguns parâmetros, como a turbidez, estarem dentro dos limites permitidos, a qualidade geral da água está comprometida por níveis inadequados de oxigênio dissolvido, sólidos totais, contaminação microbiológica e cor verdadeira, todos fora dos intervalos aceitáveis. Esses resultados sugerem um forte impacto antrópico na região, demandando ações imediatas para reduzir a carga poluente e restaurar a qualidade da água, de modo a viabilizar seu uso conforme a classificação de Classe 3.

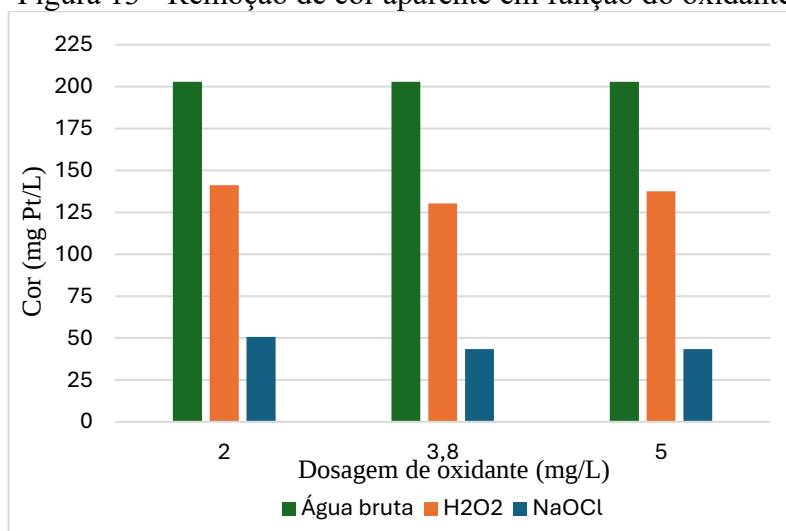
5.2 Testes em Jar Test

5.2.1 Definição do oxidante

Os ensaios em Jar Test foram realizados com o objetivo de determinar o oxidante mais eficiente na etapa de pré-oxidação da água bruta, utilizando como parâmetros de avaliação a cor aparente, cor verdadeira e turbidez. Foram comparados os efeitos do peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e do hipoclorito de sódio (NaClO) em diferentes concentrações (2, 3,8 e 5 mg/L).

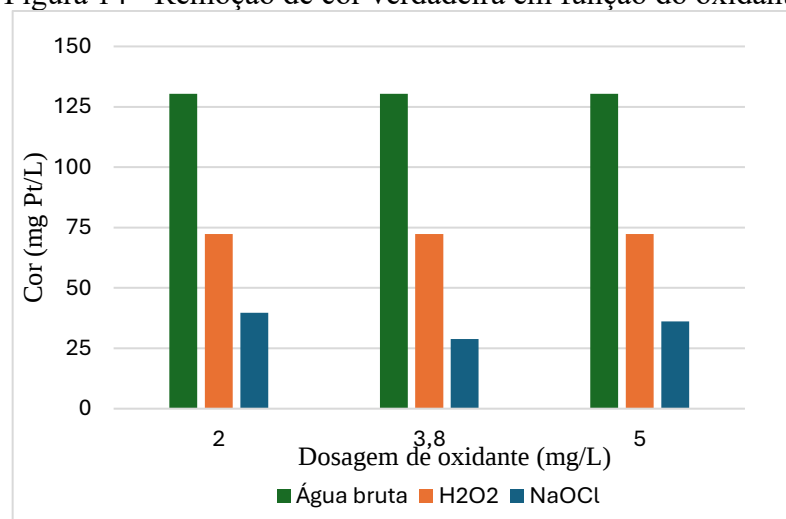
Conforme ilustrado nas Figuras 13, 14 e 15, o hipoclorito de sódio apresentou desempenho superior na redução dos três parâmetros analisados. A concentração de 3,8 mg/L destacou-se como a mais eficaz para o NaClO, alcançando uma remoção de 77% da cor verdadeira, enquanto o H₂O₂, na mesma concentração, obteve uma redução de apenas 44%. Um comportamento semelhante foi observado para a turbidez, o NaClO promoveu uma redução de 78%, enquanto o H₂O₂ resultou em apenas 34%. Esses resultados indicam que o hipoclorito de sódio é mais eficaz para a remoção de cor e turbidez nas condições testadas, tornando-se uma opção preferencial na pré-oxidação dessa amostra.

Figura 13 - Remoção de cor aparente em função do oxidante



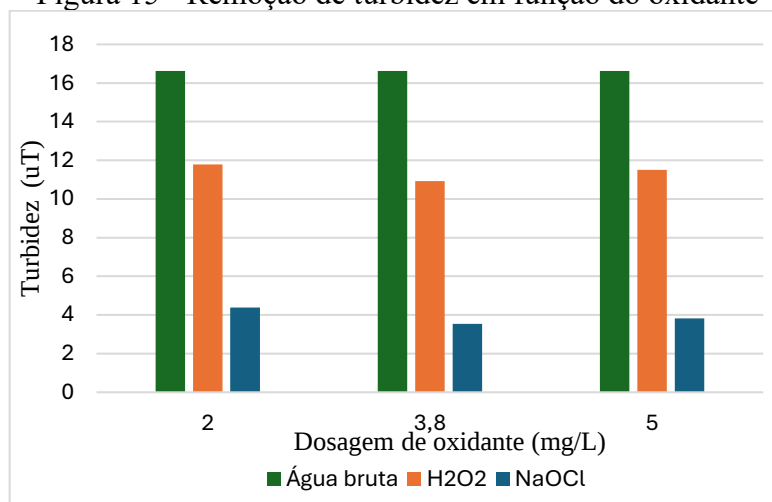
Fonte: autora, 2024.

Figura 14 - Remoção de cor verdadeira em função do oxidante



Fonte: autora, 2024.

Figura 15 - Remoção de turbidez em função do oxidante



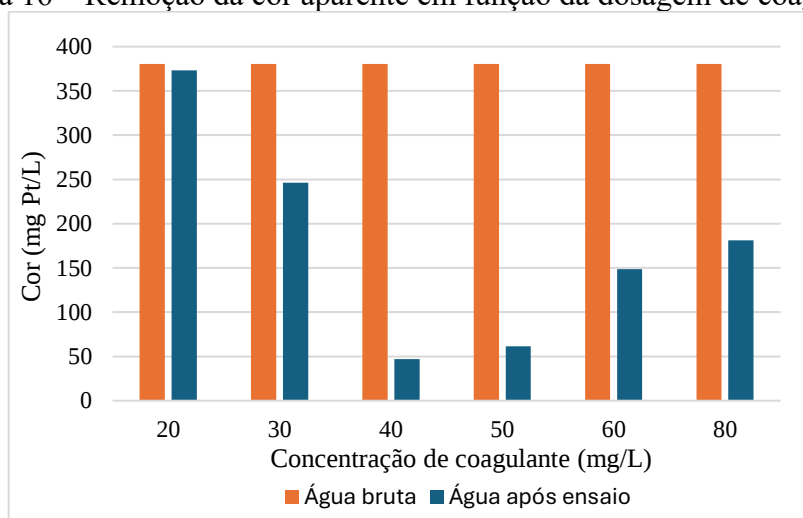
Fonte: autora, 2024.

5.2.2 Definição da concentração de coagulante

Definida a dosagem e o tipo de oxidante utilizado na etapa da pré-oxidação (3,8 mg/L e NaOCl, respectivamente), determinou-se em ensaios no Jar Test a dosagem ótima de coagulante – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$. Para isso, foram realizados ensaios de coagulação, floculação e decantação com dosagens de coagulante variando entre 20 e 80 mg/L. O objetivo destes ensaios foi o de identificar a dosagem ótima de coagulante para o tratamento dos 20L de amostra.

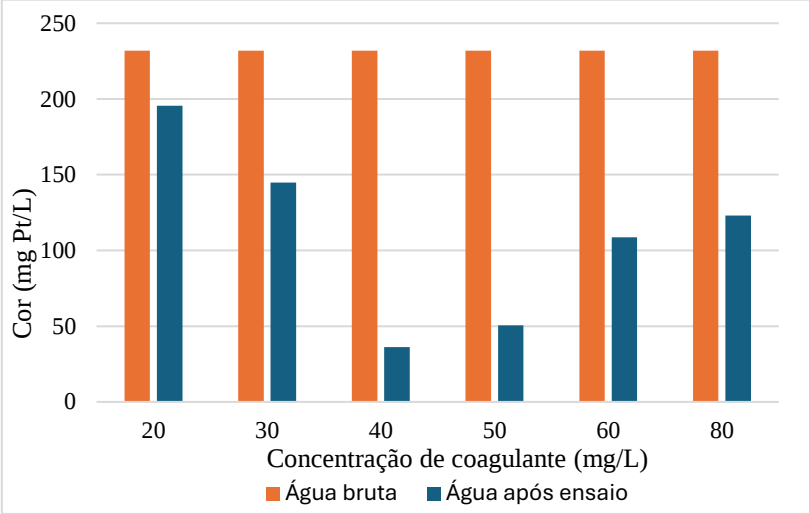
As Figuras 16, 17 e 18, mostram os resultados obtidos quanto as remoções de cor aparente, cor verdadeira e turbidez, respectivamente.

Figura 16 – Remoção da cor aparente em função da dosagem de coagulante



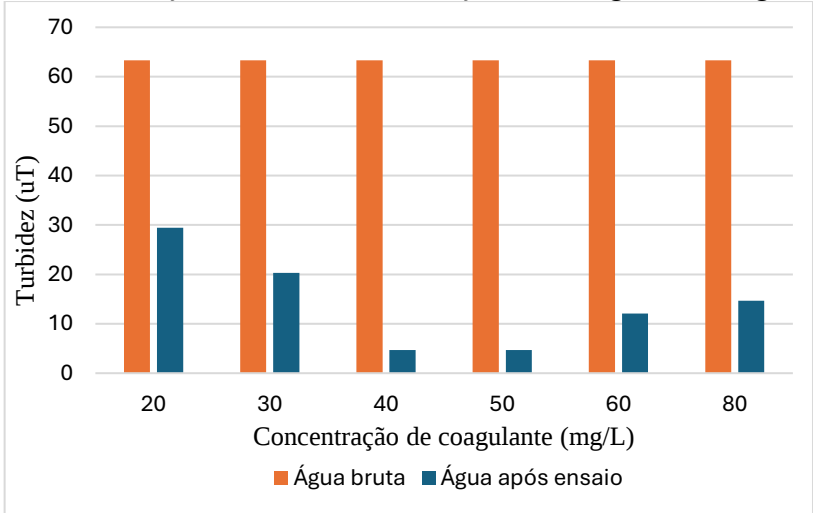
Fonte: autora, 2024.

Figura 17 – Remoção da cor verdadeira em função da dosagem de coagulante



Fonte: autora, 2024.

Figura 18 – Remoção de turbidez em função da dosagem de coagulante



Fonte: autora, 2024.

A Tabela 10 apresenta as porcentagens de remoção obtidas nos seis ensaios, para cor aparente, cor verdadeira e turbidez.

Tabela 10 – Remoção (%) após decantação

Jarro	Cor aparente	Cor verdadeira	Turbidez
1	2%	16%	54%
2	35%	38%	68%
3	88%	84%	93%
4	84%	78%	93%
5	61%	53%	81%
6	52%	47%	77%

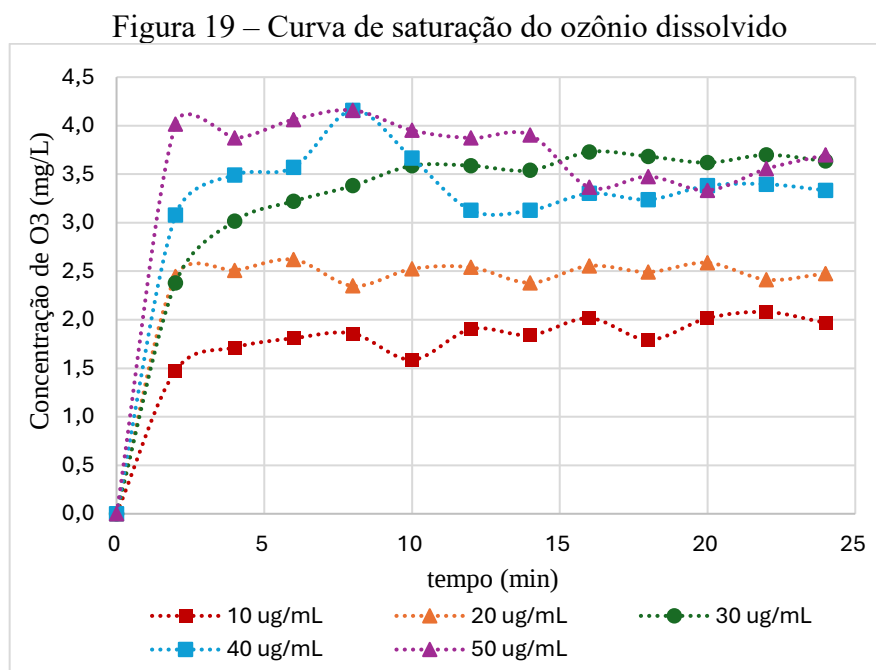
Fonte: autora, 2024.

Os resultados obtidos indicam que as maiores eficiências de remoção foram registradas nos jarros 3 e 4, correspondentes às concentrações de 40 mg/L e 50 mg/L de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, respectivamente. O jarro 3 destacou-se ao alcançar uma eficiência de remoção de 88% para cor aparente e 93% para turbidez, enquanto o ensaio 4 apresentou valores de 84% para cor aparente e 93% para turbidez. Esse desempenho sugere que a concentração de 40 mg/L do coagulante proporcionou uma condição ideal de formação e sedimentação de flocos, resultando em uma remoção mais efetiva de impurezas.

Por outro lado, o jarro 6, com uma concentração de 80 mg/L de coagulante, resultou em uma eficiência de remoção de 52% para cor aparente e 77% para turbidez. Esse comportamento sugere que, o aumento na dosagem de coagulante, não necessariamente ocasiona uma melhora proporcional no desempenho, indicando a presença de um ponto de saturação onde o excesso de coagulante não proporciona benefícios adicionais no processo de remoção.

5.3 Saturação do ozônio em água

Os resultados dos experimentos de saturação de ozônio em água são apresentados na Figura 19, mostrando a variação conforme a injeção de ozônio na coluna.



Fonte: autora, 2024.

Com base nos resultados obtidos, observa-se que a dinâmica de saturação do ozônio em fase aquosa segue um comportamento típico de equilíbrio entre a absorção e a dissolução do gás na água, condicionado pela concentração inicial injetada. As curvas demonstram um aumento rápido na concentração de ozônio dissolvido durante os primeiros 5 minutos de

injeção, seguido por uma estabilização, indicando que o sistema atingiu um ponto de saturação, no qual o ozônio dissolvido alcança seu limite de solubilidade na água.

Um aspecto relevante é que, para as concentrações de 40 e 50 $\mu\text{g/mL}$, após atingir o pico de concentração, o ozônio dissolvido diminui gradualmente ao longo do tempo. Isso provavelmente ocorre devido às reações do ozônio com compostos orgânicos e/ou inorgânicos presentes na água, já que a amostra utilizada na coluna era proveniente do abastecimento de água da UFPB.

Os valores finais de ozônio dissolvido tendem a estabilizar-se entre 2 e 4 mg/L , sugerindo que o sistema possui um limite natural de saturação.

5.4 Eficiência do sistema contínuo de tratamento da água

No tratamento físico-químico e microbiológico realizado, as etapas de filtração e adsorção foram monitoradas em intervalos regulares durante o processo contínuo, com coletas realizadas a cada 8 minutos, totalizando 40 minutos de análise. Esse intervalo foi adotado para avaliar a evolução das etapas ao longo do tempo, proporcionando uma visão detalhada sobre o desempenho de cada fase do processo.

Durante a etapa de desinfecção, a concentração de ozônio foi ajustada gradualmente, com acréscimos de 10 $\mu\text{g/mL}$, de 10 até 50 $\mu\text{g/mL}$, com intervalos de 8 minutos. Essa abordagem foi fundamental para compreender a influência da concentração de ozônio na eficiência do processo de desinfecção. Os resultados foram analisados com base na concentração final de ozônio na água, expresso em mg/L . As amostras coletadas foram numeradas de 1 a 5, conforme condições descritas na Tabela 11.

Tabela 11- Condições das amostras

Amostra	Tempo de tratamento (min)	C O ₃ gás ($\mu\text{g/mL}$)	C O ₃ água (mg/L)
1	8	10	1,563
2	16	20	1,665
3	24	30	1,768
4	32	40	2,040
5	40	50	2,696

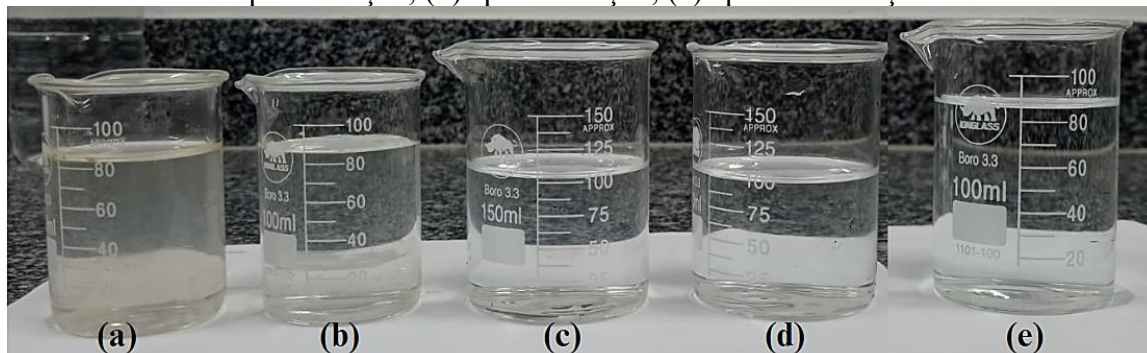
Fonte: autora, 2024.

5.4.1 Eficiência do tratamento físico-químico

No tratamento de 20L de água bruta em ciclo completo, foram coletadas amostras de água após cada etapa do tratamento, e realizadas as análises físico-químicas e microbiológicas,

que serviram como parâmetros para avaliar a eficiência do sistema. A Figura 20 ilustra o impacto de cada etapa no nível de coloração da água, evidenciando, de forma visível, a eficácia do sistema na remoção da cor.

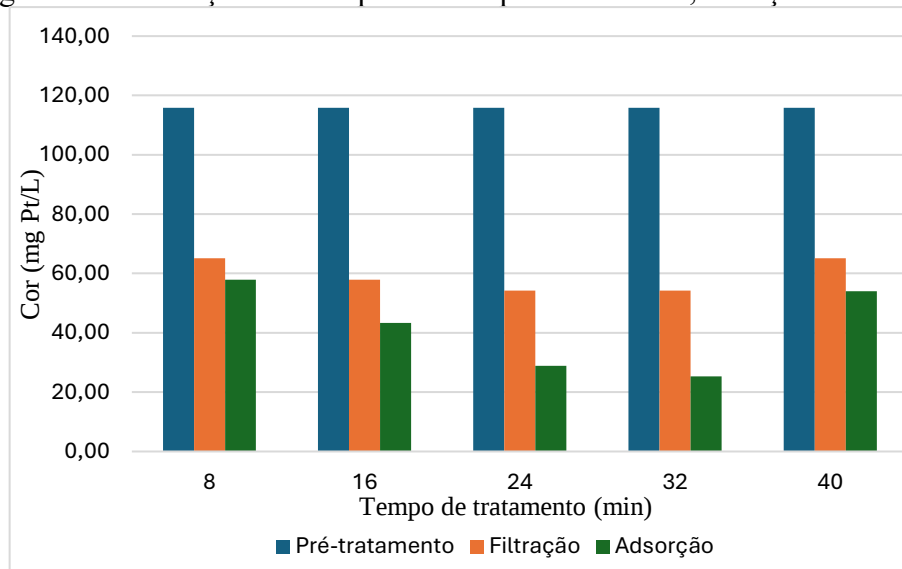
Figura 20 – Comparação da cor da água: (a) água bruta; (b) após pré tratamento; (c) após filtração; (d) após adsorção; (e) após desinfecção



Fonte: autora, 2024.

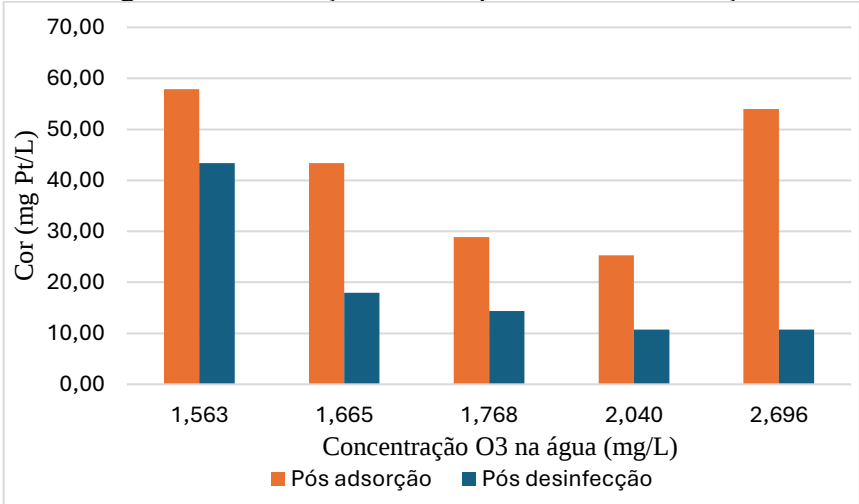
Os resultados apresentados a seguir descrevem a eficiência de cada etapa do sistema, bem como a eficiência do tratamento completo, na remoção dos parâmetros: cor aparente, cor verdadeira e turbidez. As Figuras 21 a 24 apresentam a eficiência das etapas na remoção da cor aparente e verdadeira, enquanto as Figuras 25 e 26 exibem os resultados de remoção de turbidez.

Figura 21 – Remoção de cor aparente no pré-tratamento, filtração e adsorção



Fonte: autora, 2024.

Figura 22 – Remoção de cor aparente na desinfecção



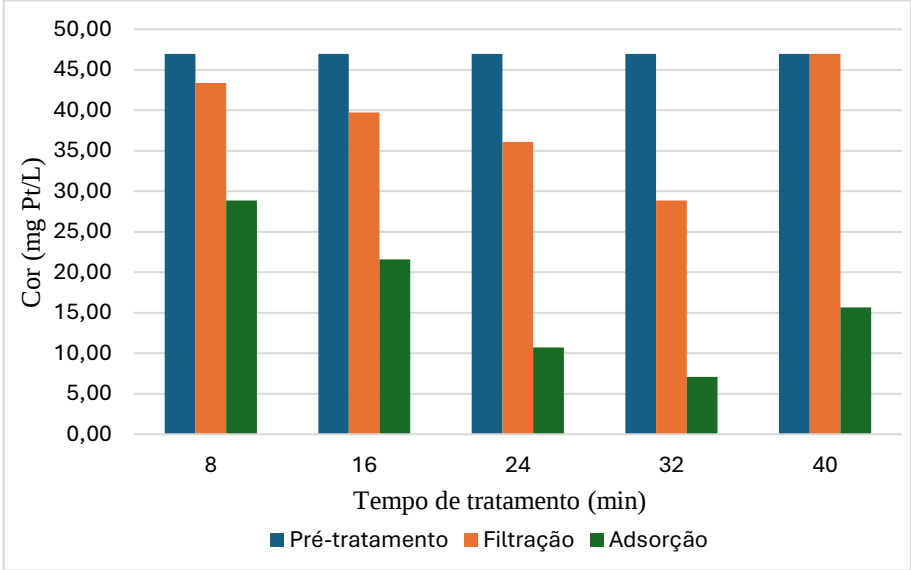
Fonte: autora, 2024.

Tabela 12 – Remoção (%) de cor aparente em cada etapa

Amostra	Pré tratamento	Após filtração	Após adsorção	Após desinfecção	Tratamento completo
1	70%	44%	11%	25%	89%
2	70%	50%	25%	59%	95%
3	70%	53%	47%	50%	96%
4	70%	53%	53%	58%	97%
5	70%	44%	17%	70%	97%

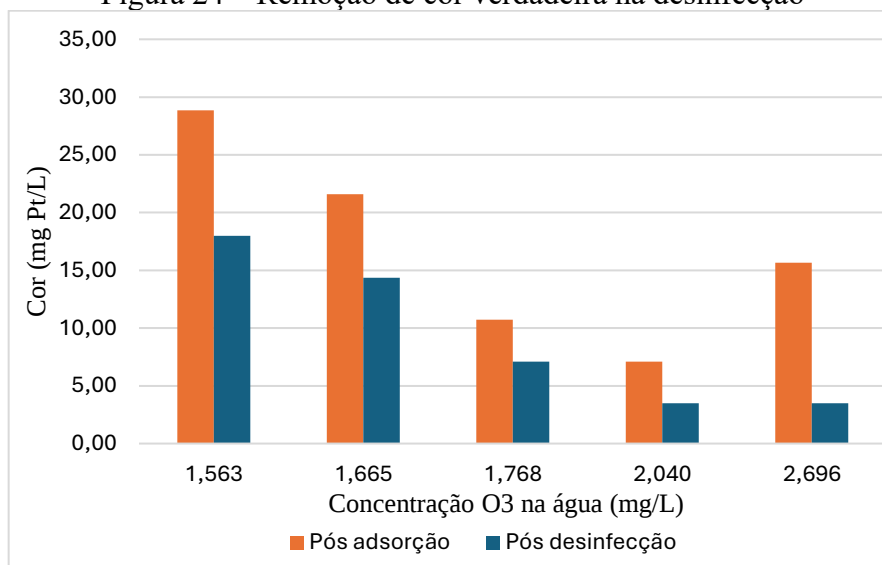
Fonte: autora, 2024.

Figura 23 – Remoção de cor verdadeira no pré-tratamento, filtração e adsorção



Fonte: autora, 2024.

Figura 24 – Remoção de cor verdadeira na desinfecção



Fonte: autora, 2024.

Tabela 13 – Remoção (%) de cor verdadeira em cada etapa

Amostra	Pré tratamento	Após filtração	Após adsorção	Após desinfecção	Tratamento completo
1	80%	8%	33%	38%	92%
2	80%	15%	46%	34%	94%
3	80%	23%	70%	34%	97%
4	80%	39%	75%	51%	98%
5	80%	0%	67%	68%	98%

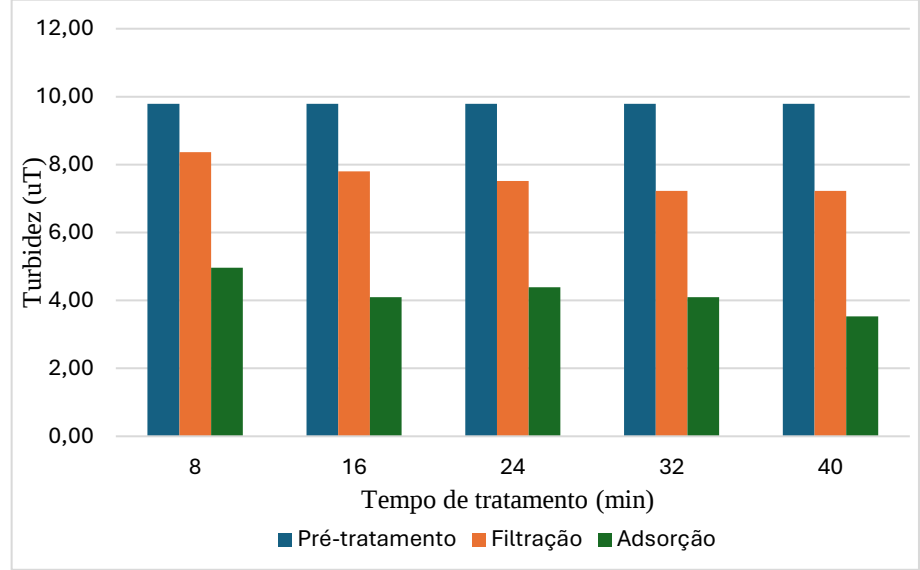
Fonte: autora, 2024.

A eficiência na remoção da cor aparente e da cor verdadeira apresentou um comportamento semelhante e progressivo ao longo dos experimentos, com destaque para a amostra 4, na qual as etapas de filtração e adsorção alcançaram a máxima eficiência. A etapa da desinfecção teve um impacto significativo nesses parâmetros, resultando em valores de 10,73 mg Pt/L para cor aparente e 3,48 mg Pt/L para cor verdadeira, o que corresponde a taxas de remoção de 70% e 68%, respectivamente.

Entretanto, os gráficos mostram uma perturbação no sistema na última amostra, evidenciada por uma queda significativa na eficiência em todas as etapas do tratamento. Essa falha pode ser atribuída, à necessidade de reabastecimento do reservatório de água, o que alterou as condições iniciais da água antes do tratamento, impactando negativamente os resultados obtidos.

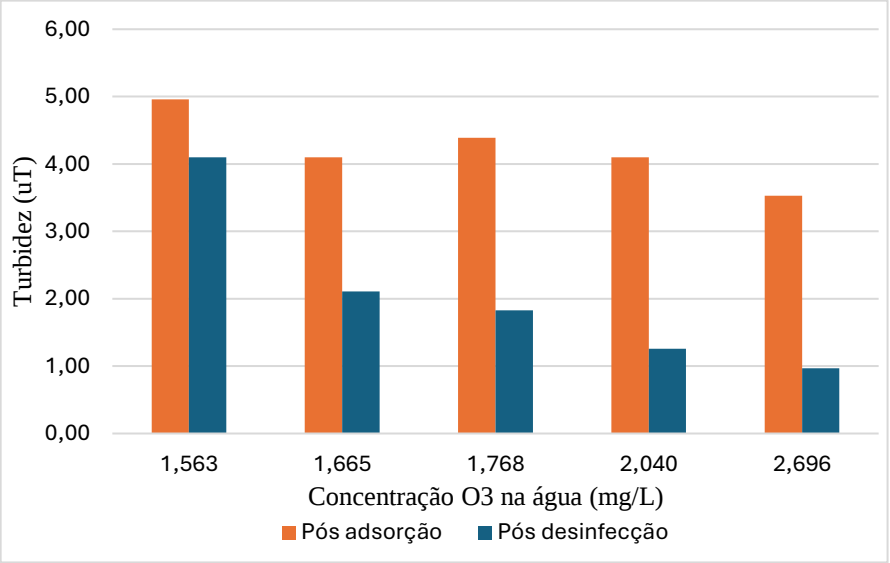
Apesar disso, o sistema de tratamento em sua totalidade apresentou uma elevada capacidade de remoção de cor verdadeira e aparente, com eficiências variando entre 89% e 98%, evidenciando a eficiência do processo na melhoria da qualidade da água.

Figura 25 – Remoção de turbidez no pré-tratamento, filtração e adsorção



Fonte: autora, 2024.

Figura 26 – Remoção de turbidez na desinfecção



Fonte: autora, 2024.

Tabela 14 – Remoção (%) de turbidez em cada etapa

Amostra	Pré tratamento	Após filtração	Após adsorção	Após desinfecção	Tratamento completo
1	85%	15%	41%	17%	94%
2	85%	20%	47%	49%	97%
3	85%	23%	42%	58%	97%
4	85%	26%	43%	69%	98%
5	85%	26%	51%	73%	98%

Fonte: autora, 2024.

No que diz respeito à turbidez, observou-se uma remoção progressiva ao longo das diferentes etapas do tratamento. O pré-tratamento desempenhou um papel crucial na redução dos efeitos adversos causados pela elevada turbidez da água bruta, sendo um fator determinante para o sucesso das etapas subsequentes. Nessa fase inicial, obteve-se uma remoção de 85%, o que ressalta a importância dessa etapa para a eficiência global do sistema.

Os resultados também mostraram uma redução contínua da turbidez após a etapa de filtração, o que indica que o filtro ainda não havia atingido seu estado estacionário. Esse comportamento sugere que, com um tempo de operação mais prolongado, seria possível alcançar níveis de turbidez ainda menores, aumentando a eficiência do sistema.

De forma geral, o tratamento se mostrou altamente eficaz na remoção de turbidez, com resultados consistentes entre as amostras. A amostra 5, em particular, apresentou a maior eficiência, com uma remoção de 98%, resultando em um valor final de turbidez de 0,97 NTU na água tratada.

5.4.2 Eficiência do tratamento microbiológico

Foram avaliados após cada etapa do tratamento a eficiência do processo na remoção de contaminantes, por meio da contagem microbiológica de CT e *E. coli*. As Tabelas 15, 16 e 17 apresentam os resultados em log de inativação microbiana e porcentagem de remoção para as etapas de filtração, adsorção e desinfecção.

Tabela 15 – Resultado das análises microbiológicas após filtração

Amostra	Coliformes totais			<i>E. coli</i>		
	UFC/100mL	Log inativação	% remoção	UFC/100mL	Log inativação	% remoção
1	70	2,3	99,45%	50	2,4	99,57%
2	71	2,3	99,44%	60	2,3	99,49%
3	46	2,4	99,64%	16	3,0	99,86%
4	171	2,0	98,65%	71	2,2	99,39%
5	25	3,0	99,80%	15	3,0	99,87%

Fonte: autora, 2024.

A etapa de filtração apresentou resultados expressivos na redução da carga microbiana. Para os coliformes totais, houve uma redução de $1,27 \times 10^4$ UFC/100 mL na água bruta para 70 UFC/100 mL após a filtração, ainda na primeira amostra, correspondendo a uma inativação de 2,3 log e uma remoção de 99,45%. De maneira similar, a contagem de *E. coli* foi reduzida de $1,17 \times 10^4$ UFC/100 mL para 50 UFC/100 mL, resultando em uma inativação de 2,4 log e

remoção de 99,57%. Os resultados indicam uma eficiência progressiva da etapa, alcançando os melhores resultados na amostra 5, com 99,8% de remoção de CT e 99,87% para *E. coli*.

Esses resultados estão de acordo com a literatura, que relata remoções superiores a 99% em sistemas de filtração bem projetados e operados de maneira adequada (ZANETI, 2012; LIMA, 2019).

Esses dados evidenciam a eficácia da filtração como uma barreira física crucial no tratamento de água, sendo altamente eficiente na remoção de partículas em suspensão e microrganismos como coliformes e *E. coli*.

Tabela 16 – Resultado das análises microbiológicas após adsorção

Amostra	Coliformes totais			<i>E. coli</i>		
	UFC/100mL	Log inativação	% remoção	UFC/100mL	Log inativação	% remoção
1	107	-0,2	-52,86%	87	-0,2	-74%
2	80	-0,1	-12,68%	50	0,1	16,67%
3	22	0,3	52,17%	15	3	6,25%
4	107	0,2	37,43%	27	0,4	61,97%
5	190	-0,9	-660 %	40	-0,4	-166,67%

Fonte: autora, 2024.

A adsorção, contudo, apresentou resultados inesperados e contraditórios. Ao invés de promover uma redução adicional da carga microbiana após a filtração, observou-se um aumento tanto na contagem de coliformes totais quanto de *E. coli*. Na primeira amostra, a contagem de CT subiu de 70 UFC/100 mL (após a filtração) para 107 UFC/100 mL, resultando em uma inativação negativa de -0,2 log e uma remoção de -52,86%.

Para *E. coli*, o comportamento foi semelhante, com a contagem aumentando de 50 UFC/100 mL para 87 UFC/100 mL, levando a uma inativação negativa de -0,2 log e uma remoção de -74%. No último ensaio, o desempenho foi ainda mais crítico, com inativações de -0,9 log para coliformes totais e -0,4 log para *E. coli*, refletindo um crescimento microbiano ao invés da redução.

Esse comportamento atípico pode estar relacionado ao desenvolvimento de biofilmes microbianos na superfície do carvão ativado. Os biofilmes são formados por células bacterianas que se fixam a superfícies sólidas e úmidas (SEBASTIANY, 2015). Segundo Gibert (2013), esses biofilmes podem se formar em filtros de água, e durante o processo de filtração, podem ser desprendidos, contaminando a água filtrada.

Diante desse cenário, é crucial implementar mecanismos que inibam o desenvolvimento desses microrganismos. Estudos conduzidos por Brasil (2017) avaliaram a impregnação de metais na superfície do carvão ativado como uma estratégia para inibir a formação de biofilmes por *Escherichia coli*. A combinação dos metais zinco e cobre na superfície do carvão ativado demonstrou ser eficaz na inibição total da formação desses biofilmes, apresentando-se como uma solução promissora para mitigar os efeitos do biofilme.

Os resultados do tratamento microbiológico após a etapa de desinfecção, estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Resultado das análises microbiológicas após desinfecção

Amostra	Coliformes totais			<i>E. coli</i>		
	UFC/100mL	Log inativação	% remoção	UFC/100mL	Log inativação	% remoção
1	0	-	100%	0	-	100%
2	15	0,73	81,3%	10	0,70	80,0%
3	0	-	100%	0	-	100%
4	13	0,92	87,9%	11	0,39	59,3%
5	33	0,76	82,6%	23	0,24	42,5%

Fonte: autora, 2024.

A etapa de desinfecção por ozônio demonstrou uma eficácia significativa na inativação dos microrganismos analisados. Nas amostras 1 e 3, observou-se uma ausência total de contaminação após o processo de ozonização, resultando em uma remoção de 100% tanto para coliformes totais quanto para *E. coli*. Contudo, nas demais amostras, a inativação de Coliformes variou entre 0,73 e 0,92 log, enquanto os resultados para *E. coli* apresentaram variações entre 0,24 e 0,70 log. Esses dados indicam que, apesar da eficácia do ozônio, a performance não foi uniforme entre todas as amostras.

Estudos realizados por Gorito et al. (2021) relataram resultados superiores ao presente estudo, evidenciando que a aplicação de ozônio a uma dosagem de 3 mg/L resultou em uma inativação de 4 log para bactérias heterotróficas totais e 2 log para *E. coli*. Essa diferença na eficiência pode ser atribuída a flutuações nas características da água tratada, com destaque para a concentração de sólidos suspensos. A presença desses sólidos atua como um fator limitante para a ação germicida do ozônio, criando uma barreira física que compromete o contato direto entre o ozônio e os microrganismos, reduzindo a eficácia do processo de desinfecção (BILOTTA, 2000).

Além disso, a ineficiência observada pode ser corroborada pelo fato de que a turbidez da água filtrada ultrapassou os limites estabelecidos pela Portaria nº 888/2021, que estipula

valores inferiores a 0,5 uT para assegurar a eficiência do processo de desinfecção. Portanto, recomenda-se a otimização das etapas de tratamento anteriores, a fim de garantir que a qualidade da água na fase de desinfecção seja adequada, assegurando uma maior eficácia do processo.

A Tabela 18 apresenta a concentração final de ozônio em solução, determinada pelo método DPD, assim como a relação entre a concentração de ozônio e o tempo de contato ($C \cdot t$), considerando um tempo de residência de 3,9 minutos na torre de absorção.

Tabela 18 – Concentração final de O_3 e valores de $C \cdot t$

Amostra	C O_3 final (mg/L)	C * t (mg.min/L)
1	1,563	6,10
2	1,665	6,49
3	1,768	6,89
4	2,040	7,96
5	2,696	10,51

Fonte: autora, 2024.

Os valores de Ct obtidos para o sistema proposto variaram entre 6,10 e 10,51 mg.min/L, evidenciando uma variação significativa na relação entre a concentração de ozônio e o tempo de contato durante os ensaios.

Um aspecto crucial na análise desses resultados é a relação entre Ct e os custos operacionais do sistema de ozonização. Para um mesmo nível de inativação, valores mais baixos de Ct indicam maior viabilidade econômica, uma vez que a desinfecção pode ser alcançada com menor consumo de ozônio e menor tempo de operação, resultando em economia de recursos e energia (SOARES, 2007).

Neste estudo, foi observado que a menor concentração aplicada de ozônio, correspondente a um Ct de 6,10 mg.min/L, foi suficiente para alcançar uma eficiência de inativação de 100%. Isso demonstra que, para o sistema em questão, a redução do valor de Ct não comprometeu a eficiência da desinfecção, tornando o processo mais econômico sem sacrificar a qualidade do tratamento.

Quando comparados aos parâmetros estabelecidos pela Portaria nº 888/2021, que recomenda um valor mínimo de $C \cdot t$ de 0,34 mg.min/L para uma desinfecção eficiente, os resultados deste estudo apresentam valores significativamente mais elevados. Isso indica que, embora o sistema proposto tenha demonstrado alta eficiência de inativação, há uma margem considerável para otimização, especialmente em termos de redução do $C \cdot t$.

6 CONCLUSÃO

A análise detalhada do desempenho das etapas do sistema de tratamento de água possibilitou identificar a eficiência de cada processo, destacando tanto suas vantagens quanto as oportunidades de melhoria. O pré-tratamento, que incluiu a pré-oxidação e coagulação, revelou-se fundamental, alcançando remoções significativas de 80% para cor verdadeira e 85% para turbidez.

Embora a filtração tenha demonstrado um desempenho relativamente baixo na remoção de substâncias responsáveis pela cor, foi altamente eficaz na redução de coliformes totais e *E. coli*, alcançando inativações de 99,8% e 99,9%, respectivamente. A etapa de adsorção contribuiu com uma redução adicional nos níveis de cor verdadeira e turbidez, alcançando eficácias de 75% e 51%, respectivamente. Contudo, o aumento inesperado na contagem de microrganismos durante essa etapa sugere a necessidade de otimização do processo.

Na etapa final de desinfecção com ozônio, os resultados foram satisfatórios, com a eliminação progressiva de turbidez e cor verdadeira, além da inativação total de coliformes e *E. coli* em algumas amostras, evidenciando a eficácia do sistema na eliminação de patógenos. De maneira geral, o sistema proposto apresenta resultados promissores, sendo economicamente viável e de fácil manutenção. No entanto, ajustes são necessários para otimizar a eficiência de cada etapa e garantir que os parâmetros de potabilidade sejam plenamente atendidos.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas limitações observadas nesse estudo, algumas sugestões podem orientar futuros trabalhos e contribuir para o aumento da eficiência do sistema proposto. Entre elas, destacam-se:

- Realizar um planejamento experimental detalhado para os ensaios de Jar-Test, avaliando os efeitos das variáveis, como a concentração de coagulante e o pH;
- Investigar o comportamento de outros parâmetros físico-químicos, como DBO e DQO, em função das diferentes concentrações de ozônio, para compreender melhor a eficácia do sistema na remoção de compostos orgânicos e inorgânicos;
- Estender o período de monitoramento da etapa de filtração, buscando avaliar a capacidade de retenção e o desempenho do filtro de areia ao longo do tempo;
- Explorar a impregnação de materiais como zinco e cobre na superfície do carvão ativado, com o objetivo de avaliar os efeitos sobre a inativação de biofilmes e melhorar a eficiência da etapa de adsorção.

Essas sugestões podem contribuir significativamente para a melhoria da eficiência do sistema, ampliando as possibilidades de aplicação e promovendo avanços tanto em termos de desempenho quanto de sustentabilidade.

REFERÊNCIA

AGOSTINHO, A. A. et al. Fish die-off in river and reservoir: A review on anoxia and gas supersaturation. **Neotropical Ichthyology**, v. 19, n. 3, 2021.

ALBUQUERQUE, M. V. DA C. et al. Remoção de cianobactérias e cianotoxinas presentes em águas de reservatórios eutrofizados por processos oxidativos avançados (POAS). **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 61234-61248, 2020.

APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. **American Public Health Association**, Washington, DC, USA., 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.216: Projeto de Estações de Tratamento de Água para Abastecimento Público**. Rio de Janeiro, 1992.

BILOTTA, Patrícia. Estudo comparativo da ação do ozônio e radiação UV na desinfecção de esgoto sanitário. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

BONATTO, I. DA C. Remoção de H₂S através de adsorção por carvão ativado. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

PETRICIOLET, A. B.; CASTILLO, D. I. M.; AVILA, H. E. R. **Adsorption processes for water treatment and purification**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2017.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente Resolução CONAMA nº. 357/2005, 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria nº 888, de 04 de maio de 2021. **Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Brasília (DF), 2021.

BRASIL, S. P. Impregnação de carvão ativado de casca de coco de dendê *Elaeis guineensis* com zinco e cobre para inibição da formação de biofilme por *Escherichia coli* ATCC 8739. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2017.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Manual de procedimentos de vigilância em saúde ambiental relacionada à qualidade da água para consumo humano**. Brasília, 2006.

BRINCK, N. C. P. Avaliação do tipo de material filtrante no comportamento hidráulico de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BUENO, F. B. DE A. Tratamento de água para abastecimento contendo cianobactérias e microcistina em sistema constituído por etapas de pré-cloração, coagulação/floculação,

flotação e adsorção em carvão ativado. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

Cai, Y. et al. Ozone based inactivation and disinfection in the pandemic time and beyond: Taking forward what has been learned and best practice. **Science of the Total Environment**, v. 862, 2023.

CARDOSO, K. de S. Avaliação da qualidade da água para consumo humano e sua relação com doenças de veiculação hídrica. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2022.

CAVALHEIRO, A. L. Tecnologia de Ponto-de-Uso (POU) para desinfecção de água para consumo humano: Reator UV-Ozônio. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2023.

COSTA, L. R. de C. Integração da ozonização no tratamento de água e efluentes: uma abordagem para a remoção e mineralização de fármacos e inativação de patógenos. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

DAVIS, M. L. **Water and wastewater engineering: Design principles and practice, second edition**. Columbus, USA: McGraw-Hill, 2010.

DI BERNARDO, L; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro: RiMA, v. 1, n. 2, 2005.

DOREVITCH, S. et al. Solar powered microplasma-generated ozone: Assessment of a novel point-of-use drinking water treatment method. **International journal of environmental research and public health**, v. 17, n. 6, p. 1858, 2020.

FRANCO, C. S. Sistema alternativo de tratamento de água em escala descentralizada. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2015.

FUKUMOTO, A. A. F. Remoção de atrazina, simazina, 17β -estradiol, 17α -etinilestradiol e microcistinas em águas para abastecimento público por tratamento em ciclo completo associado à adsorção. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2020.

GHERNAOUT, D.; ELBOUGHDIRI, N. Electrochemical technology for wastewater treatment: Dares and trends. **Open Access Library Journal**, v. 7, n. 1, p. 1–17, 2020.

GIBERT, O. et al. Characterising biofilm development on granular activated carbon used for drinking water production. **Water research**, v. 47, n. 3, p. 1101–1110, 2013.

GORITO, A. M. et al. Ozone-based water treatment (O_3 , O_3/UV , O_3/H_2O_2) for removal of organic micropollutants, bacteria inactivation and regrowth prevention. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 4, p. 10–14, 2021.

GRASSI, M. T.; JARDIM W. de F. Ozonização de águas: aspectos químicos e toxicológicos. **Revista DAE**, ed. 173, 1993.

GURGEL, R. S.; SILVA, L. S. DA; SILVA, L. A. Investigação de coliformes totais e *Escherichia coli* em água de consumo da comunidade Lago do limão, Município de Iranduba – AM. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 4, p. 2512–2529, 2020.

HEYDORN, A. et al. Experimental reproducibility in flow-chamber biofilms. **Microbiology (Reading, England)**, v. 146, n. 10, p. 2409–2415, 2000.

LANGLAIS, B.; RECKHOW, D. A.; BRINK, D. R. **Ozone in water treatment: Application and engineering: Cooperative research report**. [s.l.] Lewis Routledge, 1991.

LIBÂNIO, P. A. C.; CHERNICHARO, C. A. DE L.; NASCIMENTO, N. DE O. A dimensão da qualidade de água: avaliação da relação entre indicadores sociais, de disponibilidade hídrica, de saneamento e de saúde pública. **Engenharia sanitaria e ambiental**, v. 10, n. 3, p. 219–228, 2005.

LIM, S. et al. Ozonation of organic compounds in water and wastewater: A critical review. **Water research**, v. 213, 2022.

LIMA, A. B. P. de. Avaliação da associação da filtração lenta com a filtração rápida no tratamento da água de uma lagoa litorânea tropical com baixa turbidez e cor moderada. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

LIMA, M. F. D. DOS S. Estudos de determinação experimental dos coeficientes de reaeração e de dispersão longitudinal em rios. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

LIU, Z. et al. Enhanced coagulation of low-turbidity micro-polluted surface water: Properties and optimization. **Journal of environmental management**, v. 233, p. 739–747, 2019.

LORETO, E. de F. Avaliação da qualidade da água de consumo humano em municípios pertencentes às macrorregiões de saúde do estado do Rio Grande do Sul. Dissertação (Mestrado) – Centro Universitário La Salle, Canoas, 2014.

MAHMOUD, A.; FREIRE, R. S. Métodos emergentes para aumentar a eficiência do ozônio no tratamento de águas contaminadas. **Química nova**, v. 30, n. 1, p. 198–205, 2007.

MARMO, C. R. Formação e remoção de trihalometanos em águas de abastecimento tratadas, na pré-oxidação, com cloro. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

MARTINS, C. C.; KOZUSNY-ANDREANI, D. I.; MENDES, E. C. B. Ozônio no controle de micro-organismos em resíduos de serviços de saúde. **Revista Baiana de Enfermagem**, v. 29, n. 4, p. 318, 2015.

MCCABE, W. L.; SMITH, J.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 7. ed. New York, USA: McGraw-Hill Professional, 2005.

MONTEIRO, L. DO V. Estudo da tratabilidade do lixiviado de aterro sanitário pelos processos oxidativos avançados foto-Fenton, ozônio e ozônio combinado com peróxido de hidrogênio. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

- MONTOVANI, C. P. Condutividade elétrica e cloretos como indicador da qualidade de água. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2021.
- MORRISON, C. M. et al. Ozone disinfection of waterborne pathogens and their surrogates: A critical review. **Water Research**, v. 214, p. 118206, 2022.
- NAGARKATTI, M. G. Ozone in Water Treatment: Application and Engineering. **Journal of Environmental Quality**, v. 20, n. 4, 1991.
- NOLASCO, F. R. Desenvolvimento de um sistema para avaliação do efeito da aplicação de processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes líquidos contendo fenol ou cianeto. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- OLLER, I.; MALATO, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. A. Combination of Advanced Oxidation Processes and biological treatments for wastewater decontamination-A review. **Science of the Total Environment**, 2011.
- PARRON, L. M. et al. Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2011.
- PASCHOALATO, C. F. P. R. Efeito da pré-oxidação, coagulação, filtração e pós-cloração na formação de subprodutos orgânicos halogenados em águas contendo substâncias húmicas. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- RAMIREZ, J. C. S. Efeito das características granulométricas e da altura da camada filtrante no processo de retrolavagem em filtros de areia. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.
- RICHTER, C. A. **Água: Métodos e Tecnologias de Tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009.
- RODRIGUES, E. A. de M. Estudo de diferentes oxidantes em tratamento de água superficial aplicando ultrassom: determinação de subprodutos via cromatografia gasosa. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2020.
- ROSALÉM, S. F. et al. Avaliação de trialometanos formados na etapa de pré- oxidação com cloro e permanganato de potássio em água de abastecimento. **Revista DAE**, v. 61, n. 191, p. 54–59, 2013.
- SANTOS, D. R. V. DOS; ARMSTRONG, A. DA C.; LIMA, A. G. D. ÁGUA, SAÚDE E DOENÇA: Uma revisão sistemática sobre doenças de veiculação hídrica em comunidades indígenas brasileiras. **Revista Científica do UniRios**, v. 14, n. 25, p. 226-246, 2020.
- SAUL, B. C. Viabilidade técnica e econômica da recirculação da água de lavagem de filtros em estações de tratamento de água. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.
- SCHORR, A. Tratamento de águas e efluentes. 1ª ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos Editora, 2022.
- SEBASTIANY, L. K. Estudo da inibição da formação de biofilme de pseudomonas aeruginosa ATCC 9027 na superfície de carvão ativado impregnado com zinco e cobre em

meio filtrante de leito fixo. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2015.

SHAMMAS, N. K.; WANG, L. K. **Water engineering: Hydraulics, distribution and treatment**. 1. ed. [s.l.] Standards Information Network, 2016.

SILVA, N. A. DE S. Previsão de consumo de água na estação de tratamento de água de Gravata - PB. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021.

SOARES, L. V. Ozonização de esgoto sanitário: estudo da hidrodinâmica, transferência de massa e inativação de microrganismos indicadores. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SOUZA, F. S. Degradação de poluentes emergentes por processos oxidativos avançados (O_3 , O_3/UV , O_3/Fe^{2+} , $O_3/UV/Fe^{2+}$) visando o tratamento de efluentes hospitalares. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

STEFANELLO CADORE, J.; TOCHETTO, M. Recursos Hídricos: panorama geral do setor e perspectivas ao atendimento da Agenda 2030. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 2021.

UNICEF; WHO. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017: Special focus on inequalities. New York: United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization, 2019.

VIEIRA, J. M. P.; Morais, C. Planos de segurança em sistemas públicos de abastecimento de água para consumo humano. Universidade do Minho, Instituto Regulador de Águas e Resíduos, 2005.

WHO. Water, Sanitation, Hygiene and Health: A Primer for Health Professionals. **World Health organisation**, 2019.

WIECHETECK, G. K. Remoção de substâncias húmicas em tratamento de água por meio de pré-oxidação e dupla filtração. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

XAVIER, M. DAS V. S.; QUADROS, H. C.; SILVA, M. S. S. DA. Parâmetros de potabilidade da água para o consumo humano: uma revisão integrativa. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e42511125118, 2022.

ZANETI, R. N. Desenvolvimento e validação da técnica integrada de floculação-flotação em coluna (FFC), filtração em areia e cloração na reciclagem de água na lavagem de veículos. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.