



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

FELIPE JUNIO DE SOUSA SILVA

**ESTUDO DA DESINFECÇÃO POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA EM ÁGUAS
SUPERFICIAIS COM DIFERENTES VALORES DE TURBIDEZ: UMA
ANÁLISE CRÍTICA DA PORTARIA Nº 888/2021**

João Pessoa

2025

FELIPE JUNIO DE SOUSA SILVA

**ESTUDO DA DESINFECÇÃO POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA EM ÁGUAS
SUPERFICIAIS COM DIFERENTES VALORES DE TURBIDEZ: UMA
ANÁLISE CRÍTICA DA PORTARIA Nº 888/2021**

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

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

João Pessoa

2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586e Silva, Felipe Junio de Sousa.

ESTUDO DA DESINFECÇÃO POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA EM
ÁGUAS SUPERFICIAIS COM DIFERENTES VALORES DE TURBIDEZ:
UMA ANÁLISE CRÍTICA DA PORTARIA Nº 888/2021 / Felipe
Junio de Sousa Silva. - João Pessoa, 2025.

70 f. : il.

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

1. Desinfecção Ultravioleta. 2. Escherichia coli. 3.
Portaria nº 888/2021. 4. Dose de Radiação. 5. Turbidez.
I. Madeira, Vivian. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 66.01(043.2)

FELIPE JUNIO DE SOUSA SILVA

**ESTUDO DA DESINFECÇÃO POR RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA EM ÁGUAS
SUPERFICIAIS COM DIFERENTES VALORES DE TURBIDEZ: UMA
ANÁLISE CRÍTICA DA PORTARIA Nº 888/2021**

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

Aprovado em 23 de abril de 2025.

BANCA EXAMINADORA



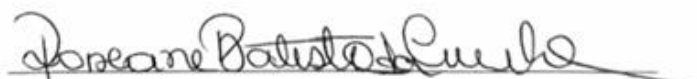
Prof.^a. Dr.^a. Vivian Stumpf Madeira

Orientador(a)



Prof.^a. Dr.^a. Ana Flávia Santos Coelho

Examinador(a)



Dr(a). Roseane Batista Cunha

Examinador(a)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente faço um agradecimento em especial aos meus pais, Levi Antonio e Vanderlice Clementino, pelo esforço e atenção durante toda minha vida. Agradeço por sempre acreditar em mim quando nem eu mesmo acreditava, e por me incentivar em todas as conversas.

Aos meus avós, Severino Do Ó, Cleonice Clementino, Maria Ivete e Levi Antonio (em memória), por sempre renovar e potencializar minhas energias. Seus conhecimentos e palavras me incentivam a crescer cada vez mais.

Aos meus amigos que fiz durante toda a graduação: Ester, Janailda, Laís, Vitória, Nataly, Matheus, Paloma. Foram essenciais em muitos momentos na Universidade, e acredito que conseguimos crescer de forma comum e juntos. Torço muito por todos.

Aos meus amigos do LACQUA: Úrsula, Clara, Flaviano, Paulo Cazé, Paulo Germano, Graciele, Ana e Thyago. Pessoas especiais que me apoiaram durante todo meu período no laboratório. Torço muito pelo sucesso de todos, e me coloco à disposição para auxiliar em trabalhos futuros, assim como fui auxiliado.

Aos meus amigos do projeto Questionando a Química: Bianca, Juliana, Livia e Diego. Um projeto lindo que nos uniu. Todas as conversas, reuniões e aulas foram gratificantes, cada momento foi importante. Além da professora Flávia que aceitou minha participação no projeto Química.CEAR, um fator importante para moldar quem sou hoje.

Aos meus amigos do Vôlei que mesmo sem saber me animaram em muitos dias que eu estava triste. Todos os jogos me alegravam de alguma maneira, foram momentos que consegui descansar a mente.

Por fim, um agradecimento especial à minha orientadora, professora Vivian, por acreditar em mim e no meu potencial. Sua orientação e sabedoria foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho e para minha formação profissional.

RESUMO

O consumo de água potável é fundamental para o ser humano. A água potável é aquela que atende o padrão de potabilidade estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888, de 04 de maio de 2021, e que não ofereça riscos à saúde. A água utilizada para o abastecimento humano pode apresentar diversos riscos para a saúde, os quais estão associados à presença de contaminantes químicos, físicos e microbiológicos. Em se tratando do padrão microbiológico, a Portaria estabelece que o valor máximo permitido é de ausência de coliformes totais e da bactéria *Escherichia coli*, em 100mL da amostra analisada e exige que toda água para consumo humano fornecida coletivamente deverá passar pelo processo de desinfecção. Uma das técnicas mais comumente empregadas para desinfecção da água é a cloração, entretanto, algumas limitações têm sido associadas ao uso do cloro e métodos alternativos, como a ozonização e do uso da radiação ultravioleta, já são contemplados na Portaria GM/MS nº888/2021. Este trabalho teve como objetivo estudar o processo de desinfecção ultravioleta (UV), com reatores em batelada e fluxo contínuo, em amostras de água coletadas no rio Jaguaribe, em João Pessoa (PB), após o tratamento físico-químico. Além disso, amostras de água coletadas no ponto de consumo, na Universidade Federal da Paraíba, também foram submetidas ao processo de desinfecção por radiação ultravioleta. Foi avaliada a influência da turbidez remanescente na água e a dose de radiação, na eficiência da desinfecção, e os valores de dose obtidos foram comparados com os estabelecidos pela Portaria nº888/2021. Para a desinfecção em batelada, os resultados indicaram que a turbidez, apesar de ser um importante fator para o processo, não é o único parâmetro determinante. Foram alcançadas inativações de 1,19 log (94%) e 1,40 log (96%), para doses de radiação de 138 e 140 mJ.cm⁻², respectivamente. Entretanto, para a desinfecção em fluxo contínuo, foi determinada que a turbidez é um parâmetro limitante no processo, já que amostras com valores mais elevados apresentaram maior resistência à inativação. Foi atingida uma inativação máxima de 1,24 log (94,3%) para uma dose de radiação de 128,4 mJ.cm⁻², da amostra com 0,69 uT. Além disso, diante dos dados alcançados no presente estudo, e observados na literatura, notou-se que a Portaria GM/MS nº888/2021 possui valores de dose mínima de radiação que não certificam uma desinfecção por radiação ultravioleta eficiente sob os parâmetros estabelecidos.

Palavras-chave: Desinfecção Ultravioleta; *Escherichia coli*; Portaria nº 888/2021; Dose de Radiação; Turbidez.

ABSTRACT

Drinking water is essential for human beings. Potable water is water that meets the drinking water standard established by Ordinance GM/MS No. 888, of May 4, 2021, and that does not pose any health risks. Water used for human consumption can present various health risks, which are associated with the presence of chemical, physical and microbiological contaminants. With regard to the microbiological standard, the Ordinance establishes that the maximum value allowed is the absence of total coliforms and *Escherichia coli* bacteria in 100mL of the sample analyzed and requires that all water for human consumption supplied collectively must undergo a disinfection process. One of the most commonly used techniques for disinfecting water is chlorination. However, some limitations have been associated with the use of chlorine and alternative methods, such as ozonation and the use of ultraviolet radiation, are already covered by GM/MS Ordinance No. 888/2021. The aim of this work was to study the process of ultraviolet (UV) disinfection, using batch and continuous flow reactors, in water samples collected from the Jaguaribe river, in João Pessoa (PB), after physical-chemical treatment. In addition, water samples collected at the point of consumption at the Federal University of Paraíba were also subjected to the ultraviolet radiation disinfection process. The influence of the remaining turbidity in the water and the radiation dose on the disinfection efficiency was evaluated, and the dose values obtained were compared with those established by Ordinance No. 888/2021. For batch disinfection, the results indicated that turbidity, although an important factor in the process, is not the only determining parameter. Inactivations of 1.19 log (94%) and 1.40 log (96%) were achieved for radiation doses of 138 and 140 mJ.cm⁻², respectively. However, for continuous flow disinfection, it was determined that turbidity is a limiting parameter in the process, since samples with higher values showed greater resistance to inactivation. A maximum inactivation of 1.24 log (94.3%) was achieved for a radiation dose of 128.4 mJ.cm⁻², for the sample with 0.69 uT. In addition, in view of the data obtained in this study and observed in the literature, it was noted that Ordinance GM/MS No. 888/2021 has minimum radiation dose values that do not certify efficient ultraviolet radiation disinfection under the established parameters.

Keywords: Ultraviolet Disinfection; *Escherichia coli*; Ordinance No. 888/2021; Radiation Dose; Turbidity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Escherichia coli</i> ampliada 6836 vezes	18
Figura 2 – Lâmpada de baixa pressão e baixa intensidade em funcionamento	21
Figura 3 – Influência da matéria em suspensão na desinfecção ultravioleta	24
Figura 4 – Classes de enquadramento para o uso da água	26
Figura 5 – Gráficos parametrizados dos fatores do IQA	28
Figura 6 – Curso do rio Jaguaribe	33
Figura 7 – Pontos de coleta das amostras para os ensaios da desinfecção em batelada ..	33
Figura 8 – Coletas da água bruta para os ensaios da desinfecção ultravioleta: a) Ponto 1; b) Ponto 2; c) Ponto 3; Ponto 4	34
Figura 9 – Fluxograma das atividades realizadas para a desinfecção em batelada	35
Figura 10 – Amostra em processo de coagulação-decantação.....	36
Figura 11 – Desenho do sistema de desinfecção em batelada	37
Figura 12 – Sistema da desinfecção em batelada	37
Figura 13 – Fluxograma das atividades realizadas para a desinfecção de fluxo contínuo.....	38
Figura 14 – Ensaio em Jar Test para o processo contínuo	39
Figura 15 – Sistema mecânico utilizado para coagulação e o sistema de filtração.....	40
Figura 16 – Desenho do reator para desinfecção contínua	40
Figura 17 – Sistema construído para a desinfecção ultravioleta por fluxo contínuo.....	42
Figura 18 – Coleta da amostra na residência universitária para desinfecção UV no ponto de uso	43
Figura 19 – Processo de limpeza do reator	44
Figura 20 – Métodos para a contagem e quantificação de coliformes totais e <i>E. coli</i> ...	44
Figura 21 – Contagem dos microrganismos no microscópio	45

Figura 22 – Meio de cultura na autoclave e tratamento térmico das amostras em banho-maria	45
Figura 23 - Cultivo dos esporos de bactérias aeróbias	46
Figura 24 – Gráfico do comportamento da inativação em função dos diferentes níveis de turbidez	53
Figura 25 – Gráfico da remoção da Cor Aparente	55
Figura 26 – Gráfico da remoção da Cor Verdadeira	55
Figura 27 – Gráfico da remoção da Turbidez	55
Figura 28 – Perfil de Inativação dos microrganismos para a dose de $215,8 \text{ mJ.cm}^{-2}$	58
Figura 29 – Teste de ausência/presença de <i>E. coli</i>	60
Figura 30 - Perfil de Inativação da <i>Escherichia coli</i> para a dose de $128,4 \text{ mJ.cm}^{-2}$	61
Figura 31 - Teste de ausência/presença de <i>E. coli</i>	62
Figura 32 - Teste de ausência/presença de <i>E. coli</i>	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Patógenos potencialmente presentes em águas não tratadas	16
Tabela 2 – Valores da dose de radiação para inativar alguns microrganismos patogênicos	23
Tabela 3 – Valores da dose de radiação para inativar alguns microrganismos patogênicos	23
Tabela 4 – Parâmetros para o cálculo do Índice de Qualidade de Água	27
Tabela 5 – Faixas para avaliar a qualidade da água no estado da Paraíba	28
Tabela 6 – Detalhes da coleta e tratamento da amostra para a desinfecção em batelada	34
Tabela 7 – Volume útil do reator contínuo	41
Tabela 8 – Materiais utilizados no equipamento	42
Tabela 9 – Métodos aplicados para as análises microbiológicas	46
Tabela 10 – Métodos aplicados para as análises físico-químicas	47
Tabela 11 – Caracterização das amostras da água bruta e da água tratada	49
Tabela 12 – Desinfecção em batelada das amostras para os diferentes valores de turbidez	50
Tabela 13 – Análise da eficiência da desinfecção das amostras por ponto de coleta	52
Tabela 14 – Estudo cinético da Inativação da <i>Escherichia coli</i>	54
Tabela 15 - Caracterização da água bruta e água tratada	56
Tabela 16 - Caracterização da Água filtrada	60
Tabela 17 – Resultados obtidos da desinfecção ultravioleta em fluxo contínuo	61
Tabela 18 - Caracterização da água do ponto de uso	63
Tabela 19 – Custo da montagem do reator	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
3.1 Da importância aos níveis de poluição e disponibilidade da água.....	16
3.1.1 Doenças de Veiculação Hídrica.....	16
3.2 Microrganismos indicadores de qualidade de água.....	17
3.3 Desinfecção.....	19
3.3.1 Desinfecção por Radiação Ultravioleta.....	19
3.3.1.1 Dose de Radiação.....	20
3.3.1.2 Lâmpadas.....	21
3.3.1.3 Desinfecção no Ponto de Uso (POU).....	22
3.3.1.4 Cinética de Desinfecção.....	22
3.4 Qualidade da Água.....	24
3.4.1 Critérios da Classificação das Águas por enquadramento.....	25
3.4.2 Índice de Qualidade de Água.....	27
3.5 Processos de Tratamento da água.....	30
3.5.1 Coagulação.....	30
3.5.2 Filtração.....	31
4 METODOLOGIA.....	32
4.1 Caracterização da área de estudo e dos pontos de coleta.....	32
4.2 Desinfecção por radiação em Reator Batelada.....	35
4.2.1 Sistema da desinfecção.....	36
4.3 Desinfecção por radiação em Reator em Fluxo Contínuo.....	38
4.3.1 Reator contínuo.....	40
4.4 Teste da Desinfecção no Ponto de uso.....	42

4.5 Limpeza do reator contínuo.....	43
4.6 Análise Microbiológica	44
4.7 Inativação microbiológica	47
4.8 Análises físico-químicas	47
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1 Desinfecção por radiação ultravioleta em Reator Batelada	49
5.2 Desinfecção por radiação ultravioleta em Reator de fluxo Contínuo	54
5.2.1 Tratamento físico-químico na água bruta – Jar Test	54
5.2.2 Aplicação da desinfecção por radiação ultravioleta em reator de fluxo contínuo	58
5.2.2.1 Análise da eficiência de inativação para diferentes espécies.....	58
5.2.2.2 Análise da eficiência de inativação para amostra com menores valores de dosagem e turbidez.....	60
5.2.2.3 Análise da eficiência de inativação no ponto de uso.....	63
5.2.3 Custo da montagem do reator em fluxo contínuo	64
6 CONCLUSÃO.....	65
6.1 Perspectivas para trabalhos futuros	66
7 REFERÊNCIAS	67

1 INTRODUÇÃO

A água é essencial para a vida do ser humano, garantindo a vitalidade e dignidade. Para isso, ao ser consumida, é necessária que esteja potável e segura, tornando-se uma barreira às doenças de veiculação hídrica. Contudo, no ano de 2022 pelo menos 1,7 bilhão de pessoas fizeram o uso de água contaminada por origem fecal, indicando a falta da segurança hídrica para esse número alarmante de pessoas no mundo. Algumas doenças podem ser transmitidas com a distribuição de água com esse tipo de contaminação, como por exemplo a diarreia, que causa aproximadamente 505 mil mortes por ano (WHO, 2023).

No Brasil, os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) informam que 84,9% da população brasileira é abastecida com água tratada, e isso evidencia que mais de 32 milhões de brasileiros estão em insegurança ao consumir água contaminada por diversas origens. No Nordeste, especificamente, a escassez hídrica anual potencializa os problemas da qualidade da água, proporcionando a falta da segurança do padrão de potabilidade, além de gerar problemas sociais e econômicos (TOMAZ; SANTOS; JEPSON, 2023).

A soma da insegurança e da escassez hídrica revelam a necessidade de medidas que proporcionem métodos para tentar alcançar uma água segura. No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888, de 04 de maio de 2021, legisla atualmente sobre a qualidade da água destinada ao abastecimento público, apresentando os valores máximos permitidos para uma amostra de água ser considerada potável (padrão de potabilidade). Sobre os parâmetros microbiológicos, a Portaria enfatiza, no Anexo I, a ausência de coliformes totais e de *Escherichia coli*, indicador de contaminação fecal, o que esclarece a necessidade de um processo de desinfecção de águas contaminadas (BRASIL, 2021).

Nesse sentido, Portaria GM/MS nº 888/2021 retrata que toda água destinada ao consumo humano deve obrigatoriamente ser submetida a um processo de desinfecção, por cloração, ozonização ou radiação ultravioleta. O método mais realizado no mundo utiliza o cloro com agente oxidante na inativação dos microrganismos patogênicos, ao liberar o ácido hipocloroso em solução. Contudo, ao fazer o uso de cloro em amostras de água com altos teores de matéria orgânica, é possível a formação de trihalometanos na água pós-desinfecção, composto com alto poder cancerígeno (BAIRD, 2001). Vale ressaltar também, que esse método possui baixo poder

de inativação dos patógenos mais resistentes, com os protozoários *Giardia* e *Cryptosporidium*, por exemplo (SOUZA, 2012).

Dessa forma, a radiação ultravioleta torna-se um vantajoso método de desinfecção, pois além de não proporcionar subprodutos que despertam riscos à saúde humana, é uma forma de inativar os microrganismos patogênicos que ocorre sem a adição de produtos químicos. Ademais, a utilização desse método de inativação é crescente nos sistemas de desinfecção no ponto de consumo (POU), por tratar de um processo mais compacto e com a necessidade de manutenção mais prolongada.

Para uma desinfecção por radiação ultravioleta ser eficiente, dois fatores são fundamentais: a qualidade da água tratada que abastece o sistema de desinfecção e a dose mínima aplicada. A Portaria nº 888/2021 estabelece em seu Art. 30, para sistemas e soluções alternativas coletivas de abastecimento de água com captação em manancial superficial, que no controle do processo de desinfecção por radiação ultravioleta, deve ser observada uma dose mínima de $2,1 \text{ mJ.cm}^{-2}$ para 1 log (90%) de inativação de cisto de *Giardia* spp. Já em seu Art. 31, para sistemas e ou soluções alternativas coletivas de abastecimento de água supridas por manancial subterrâneo, no caso da desinfecção por radiação ultravioleta, deve ser observada a dose mínima de $1,5 \text{ mJ.cm}^{-2}$ (BRASIL, 2021).

Dentro desse contexto, o presente trabalho teve como objetivo estudar a inativação de microrganismos indicadores da qualidade da água pelo processo de desinfecção por radiação ultravioleta em diferentes amostras de água. Para isso, foi projetado e construído um sistema de desinfecção por radiação ultravioleta a ser operado em batelada e um sistema de desinfecção em reator de fluxo contínuo. Foram avaliadas as influências dos parâmetros de qualidade da água e dose aplicada, na eficiência obtida para a desinfecção.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o uso da radiação ultravioleta na inativação de microrganismos indicadores de contaminação presentes na água, por meio de reatores em batelada e reatores de fluxo contínuo.

2.2 Objetivos Específicos

- Projetar e construir um equipamento contínuo para desinfecção por radiação ultravioleta;
- Coletar amostras de água bruta em manancial superficial, caracteriza-las, realizar um tratamento convencional (coagulação, floculação, decantação e filtração), e realizar a desinfecção da água tratada obtida por meio da radiação ultravioleta;
- Coletar amostras de água tratada, no ponto de uso, e realizar a desinfecção da água por meio da radiação ultravioleta;
- Avaliar a influência da turbidez remanescente na água sobre a eficiência do processo de desinfecção por radiação ultravioleta;
- Comparar a inativação de diferentes microrganismos para uma mesma dose de radiação ultravioleta aplicada;
- Confrontar a dose da radiação ultravioleta aplicada e os resultados de eficiência de inativação obtidos, com a dose mínima da radiação proposta pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Da importância aos níveis de poluição e disponibilidade da água

A água é fundamental para haver vida no planeta, desde atividade na agricultura até o necessário abastecimento público de água potável. Contudo um estudo realizado em 2020 pelo Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) afirma que 73,7 milhões de pessoas em 2035 irão enfrentar insegurança na disponibilidade de água no Brasil; e essa escassez ainda é potencializada pela contaminação dos corpos hídricos no país com o aumento da taxa de urbanização (BRASIL, 2020).

A preocupação com os recursos hídricos, diz respeito não apenas a quantidade, mas também a qualidade. A água poluída, além de ser inútil às principais necessidades, se torna fonte de veiculação de doenças (FEITOSA et al, 2020).

3.1.1 Doenças de Veiculação Hídrica

Doenças de veiculação hídrica são aquelas causadas pela presença de microrganismos patogênicos, como as bactérias, vírus e parasitas na água utilizada para diferentes usos. Eventualmente, essas doenças podem atingir um maior número de pessoas causando surtos ou proporções ainda maiores, como as epidemias (CETESB, 2023). Além disso, a transmissão de organismos patogênicos ao ser humano pode então ocorrer pela ingestão direta ou indireta de água não tratada, ou tratada de má qualidade (ASSIRATI, 2005). Alguns microrganismos patogênicos estão listados na Tabela 1 relacionado com seus respectivos sintomas.

Tabela 1 - Patógenos potencialmente presentes em águas não tratadas

	Organismos	Doença	Sintomas
Bactérias	<i>Escherichia coli</i>	Gastrenterite	Diarreia
	<i>Leptospira</i> (spp.)	Leptospirose	Icterícia, febre
	<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera	Diarreia severa
Protozoários	<i>Cryptosporidium parvum</i>	Criptosporidiose	Diarreia, gastrenterite
	<i>Giardia lamblia</i>	Giardíase	Diarreia, náusea, gastrenterite
Vírus	Rotavírus	Gastrenterite	Diarreia severa e febre

Fonte: adaptado ASSIRATI,2005; TCHOBANOGLIOUS, 2003; USEPA, 1999.

Um estudo realizado por De Melo et. al. (2023) mostrou que houve, entre os anos de 2017 a 2021, um total de 2.339 mortes no Brasil por diarreia e gastroenterite, com especificamente 817 mortes (35%) apenas na região nordeste. As doenças e sintomas como

diarreia e gastroenterite estão relacionadas à não desinfecção/inativação dos microrganismos presentes nas águas destinadas ao abastecimento público.

3.2 Microrganismos indicadores de qualidade de água

A água potável é aquela que atenda ao padrão de potabilidade, um conjunto de valores permitidos para os parâmetros de qualidade da água. Dentre os parâmetros de qualidade tem-se o padrão microbiológico (como a ausência de coliformes totais e a manutenção dos residuais mínimos de agente desinfetante), o padrão organoléptico (valores máximos para metais, cloretos e sulfatos, por exemplo), o padrão de substâncias químicas que representam risco a saúde (metais pesados, compostos organoclorados, agrotóxicos, cianotoxinas e outros) e o padrão radiológico (BRASIL, 2021).

A crescente urbanização e a falta de saneamento básico adequado, principalmente a coleta e o tratamento do esgoto, tem provocado altos índices de eutrofização nos corpos d'água, e crescentes contaminações microbiológicas nas águas. A vigilância da qualidade microbiológica da água é essencial, e embora sejam disponíveis métodos para determinação específica de microrganismos patogênicos responsáveis pelas doenças de veiculação hídrica, essas análises são complexas, demoradas e dispendiosas. Neste caso, são utilizados microrganismos indicadores da presença de espécies patogênicas, como os Coliformes totais, a bactéria *Escherichia coli* e esporos de bactérias aeróbias.

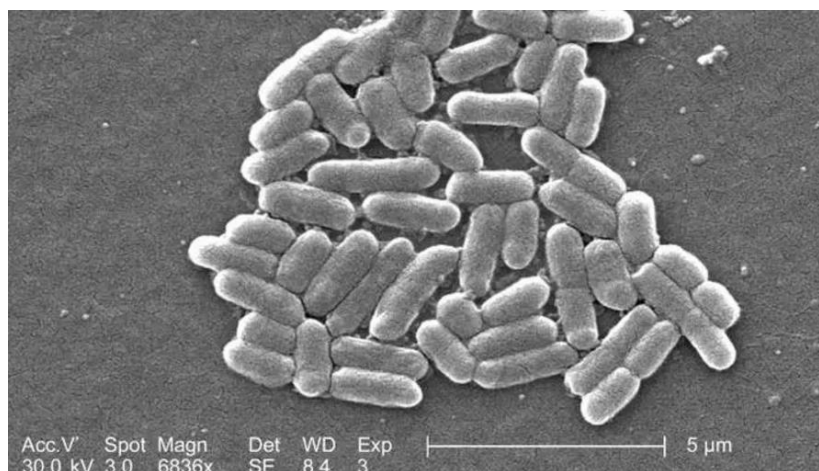
Os **Coliformes totais** são encontrados naturalmente no meio ambiente como no solo, na água e nos dejetos humanos ou de animais. A presença de coliformes totais, por si só, não implica que a água esteja comprometida, mas pode indicar a presença de bactérias potencialmente patogênicas (MICROAMBIENTAL, 2021), como a *Escherichia coli*.

A *Escherichia coli* (*E. coli*), por sua vez, é usada como indicador de contaminação de origem fecal, já que esse microrganismo é encontrado nos intestinos do homem e de animais de sangue quente (SILVA, 2007). Além disso, a *E. coli* possui outros fatores que favorecem o seu uso como indicador de contaminação:

- Pode ser detectada e quantificada de forma rápida e simples em amostras no laboratório;
- É economicamente uma quantificação viável;
- Sua concentração na água é proporcional ao grau de contaminação fecal da amostra;
- É incapaz de se reproduzir em ambientes aquáticos (FUNASA, 2013).

Quando a *E. coli* é detectada em grandes quantidades em amostras de água, significa que recebeu contaminação de esgoto. O extensivo emprego desses coliformes fecais como indicadores de qualidade da água é fundamentado pela inexequibilidade do monitoramento individual dos diversos parasitos presentes nas águas naturais. A Figura 1 apresenta a *Escherichia coli* vista em microscopia eletrônica.

Figura 1 - *Escherichia coli* ampliada 6836 vezes



Fonte: CAIUSCA, 2019.

Os protozoários mostrados na Tabela 1, **Cryptosporidium e Giardia**, ainda representam um desafio para a produção de água tratada destinada ao consumo humano (WHO, 2011). Contudo, o estudo desses microrganismos é um processo laborioso, de alto custo, além de enfrentar dificuldades analíticas de quantificação em amostras com baixas concentrações desses patógenos. Dessa forma, outros indicadores têm sido testados para avaliação da remoção/inativação de cistos e oocistos de protozoários por meio do tratamento de água, entre os quais os **esporos de bactérias aeróbias – EBA** (OLIVEIRA, BASTO, DA SILVA, 2018).

Os EBAs é uma forma que as bactérias possuem para resistir no solo e na água, no entanto alguns esporos aeróbios podem ter se adaptado à vida no trato digestório de animais e dos seres humanos (LOGAN, 2012). OLIVEIRA, BASTO e DA SILVA (2018) ainda estudaram que há uma série de similaridades entre oocistos de *Cryptosporidium* e EBA (ciclo de vida, semelhanças anatômicas e morfológicas, carga elétrica, hidrofobicidade, transporte, retenção, sobrevivência), que fazem dos esporos potenciais indicadores da presença/remoção de protozoários em água para consumo humano, principalmente em relação as suas estruturas de resistência. Assim possibilitando a caracterização e quantificação dos EBAs, no processo de desinfecção, no lugar dos protozoários.

A Portaria nº 888/2021 cita em seu Art. 29 que sistemas e soluções alternativas coletivas de abastecimento de água que utilizam mananciais superficiais **devem** realizar monitoramento mensal da *Escherichia coli* nos pontos de captação de água. Ao observar uma média geométrica móvel em 1 ano de monitoramento maior ou igual a 1000 *Escherichia coli*/100mL deve ser avaliada a eficiência do sistema semanalmente através do monitoramento de esporos de bactérias aeróbias, sendo indicado que esse monitoramento persista semanalmente enquanto as condições da média móvel da *E. coli* permanecerem (BRASIL, 2021).

3.3 Desinfecção

O processo da desinfecção visa inativar os microrganismos patogênicos presentes em amostras de água ou efluentes, para impedir a disseminação de doenças de veiculação hídrica. A Portaria nº 888/2021 legisla sobre a água potável destinada ao consumo humano e enfatiza no Art. 24 que toda água destinada ao consumo humano deve ser submetida ao processo de desinfecção (BRASIL, 2021).

É necessário entender também que toda água potável deve estar em conformidade com os Anexos de 1 a 8 da Portaria, com está citado no Art. 27, com destaque para o Anexo 1 que ressalta a ausência de coliformes totais nas amostras de água potável. Já no Art. 28 observa-se que para obter a garantia da qualidade microbiológica da água pode-se, de forma complementar, ser seguido o padrão de turbidez (Anexo 2), sendo exigido que a água a ser desinfetada (após a filtração) possua um valor de 0,5 uT (BRASIL, 2021).

Os processos de desinfecção mais estudados e conhecidos são com os agentes oxidantes cloro, ozônio (O₃) e a radiação ultravioleta (UV). Contudo, a formação de subprodutos é mínima, quando se emprega a radiação UV como agente desinfetante, porque este atua por meio físico, atingindo principalmente os ácidos nucleicos dos microrganismos, enquanto que desinfetantes como o cloro podem gerar subprodutos que apresentam potencial cancerígeno (BARROSO; WOLF, 2009).

3.3.1 Desinfecção por Radiação Ultravioleta

A desinfecção por radiação ultravioleta promove modificações no DNA e RNA dos microrganismos a serem inativados por fotólise, promovendo o rompimento das ligações dos ácidos nucleicos a partir da radiação germicida. Mas vale ressaltar que ao propor o processo de inativação por radiação ultravioleta é necessário, após a desinfecção, realizar a adição de cloro para manter um residual mencionado no Art. 32 da Portaria, para destinar essa água desinfetada ao consumo humano.

Ao estudar esse método de inativação é importante entender a dose de radiação aplicada pelo sistema que visa a inativação dos microrganismos patogênicos. No Art. 30 observa-se que para sistemas e soluções alternativas coletivas de abastecimento de água com captação em mananciais superficiais é estabelecido uma dose de radiação de $2,1 \text{ mJ.cm}^{-2}$ para 1,0 log de inativação (90%) de cistos de *Giardia* (BRASIL, 2021).

Paralelo a isso, a Portaria no Art. 31 cita que os sistemas e soluções alternativas coletivas de abastecimento de água captada de mananciais subterrâneos deve ser observada uma dose mínima de radiação de $1,5 \text{ mJ.cm}^{-2}$. Esses valores servem como norte no projeto e aplicação de equipamento que promovem a desinfecção por radiação ultravioleta.

3.3.1.1 Dose de Radiação

A dose de radiação ultravioleta pode ser entendida como o tempo de exposição de uma determinada amostra a ser inativada a uma fonte germicida, agindo como um agente oxidante na eliminação dos microrganismos. A dose pode ser expressa pelo produto da intensidade da radiação pelo tempo de contato/exposição à lâmpada no comprimento de onda em 254 nanômetros (TINÔCO, 2011).

$$D = I \cdot t \quad (1)$$

Em que, D = dose de radiação UV (mJ.cm^{-2}); I = intensidade de radiação (mW.cm^{-2}); t = tempo de exposição (s).

Contudo, a intensidade da radiação diminui à medida que penetra em uma substância material, principalmente devido à absorção. Na prática, a intensidade da absorção da radiação é descrita pela transmitância, que é definida como a medida da fração incidente da luz transmitida através da coluna de água (ARTICHOWICZ; LUCZKIEWICZ; SAWICKI, 2020). A intensidade da radiação, em função da lâmina de líquido, é dada pela lei de Beer-Lambert, como mostra a equação 2:

$$I(x) = I_0 \cdot \exp(-\alpha x) \quad (2)$$

Integrando para toda a extensão da lâmina de líquido, tem-se a intensidade média efetiva na equação 3:

$$I_M(x) = I_0 \cdot \frac{(1 - \exp(-\alpha x))}{\alpha x} \quad (3)$$

Onde I_0 é a intensidade da radiação ultravioleta pela fonte (mW.cm^{-2}), I_M é a intensidade média efetiva na lâmina de líquido (mW.cm^{-2}), α é o coeficiente de absorção da amostra em 254 nm e x é a espessura da lâmina de líquido, cm.

Vale ressaltar que o coeficiente de absorção é a razão entre o valor da absorbância lido da amostra em 254 nm e o caminho óptico da cubeta utilizada para coletar o valor no espectrofotômetro. Para Silva (2007), a faixa UV-C (200nm – 280nm) abrange um potencial germicida, com um maior desempenho no comprimento de 254nm, e essa faixa corresponde ao uso de lâmpadas do tipo baixa pressão. Além disso, a leitura, por espectrofotometria, nesse comprimento de onda promove a correção da intensidade aplicada pela fonte de radiação UV e, dessa forma, determinando a intensidade média efetiva na desinfecção.

3.3.1.2 Lâmpadas

O processo da desinfecção UV promove uma fotólise no material genético (DNA e RNA) dos microrganismos por meio da transferência de energia emitida pelas lâmpadas germicidas. Existem algumas variações de lâmpadas germicidas: alta pressão, média pressão e baixa pressão. No entanto, as lâmpadas mais usadas são de baixa pressão e baixa intensidade tanto no tratamento de água destinada ao consumo humano, quanto ao tratamento do esgoto sanitário (TINÔCO, 2011).

As lâmpadas de baixa pressão são formuladas com um tubo de quartzo com eletrodos de tungstênio em cada extremidade, com vapor de mercúrio preenchendo o tubo, promovendo uma coloração azul-esverdeada, quando em funcionamento (MARTINS, 2021). A Figura 2 é um exemplo do funcionamento de uma lâmpada germicida de baixa pressão utilizada nesse estudo.

Figura 2 – Lâmpada de baixa pressão e baixa intensidade em funcionamento



Fonte: Autor.

A energia emitida, por esse tipo de lâmpada, no comprimento de onda de 253,4 nm representa de 30% a 50% da potência nominal da fonte de radiação, acarretando a dissipação da energia residual em forma de calor (MARTINS, 2021).

3.3.1.3 Desinfecção no Ponto de Uso (POU)

Os sistemas de tratamento de água realizados de forma individual, geralmente em domicílios, são chamados de tecnologias do ponto de uso, que promovem a desinfecção para consumo imediato da água (BAILEY et al., 2021). São alternativas para inativar os patógenos e possibilita um consumo de água segura e potável.

Com uma baixa geração de resíduos, o não uso de reagentes químicos na linha do ponto de uso, além da possibilidade da inativação de patógenos mais resistentes, a desinfecção por radiação ultravioleta junto à tecnologia POU possibilita um mecanismo com uma boa facilidade para a produção de uma água segura.

Governos, setor privado e organizações internacionais estão fazendo uso dessa tecnologia buscando melhorar a qualidade de água para uso em escolas, instalações de saúde ou outros estabelecimentos, além do uso por militares, viajantes e localidades em situações de desastres (BAILEY et al., 2021).

3.3.1.4 Cinética de Desinfecção

Para uma cinética de inativação dos microrganismos, de primeira ordem em relação à concentração de microrganismos e de primeira ordem em relação à intensidade média efetiva, a fração dos patógenos (N/N_0), em um reator em batelada, é dada por:

$$-r_{\text{inativação}} = k_{UV} I_M N \quad (4)$$

$$-\frac{dN}{dt} = k_{UV} I_M N \quad (5)$$

$$-\ln \frac{N}{N_0} = k_{UV} I_M t \quad (6)$$

Na equação 6, o produto da intensidade média efetiva pelo tempo de reação/exposição da amostra em um reator em batelada, ($I_M \cdot t$), é definido como a dose de radiação aplicada ($\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}$).

Para um reator contínuo do tipo PFR (Plug Flow Reactor), a fração de microrganismos remanescentes após a desinfecção, é uma função exponencial do volume do reator (V_{PFR}) ou da dose aplicada ($I_M \cdot t_{\text{RES}}$). Essa relação é dada por:

$$\frac{dN}{dV_{PFR}} = -k_{UV} I_M N \quad (7)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -k_{UV} I_M \frac{V_{PFR}}{\vartheta} \quad (8)$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -k_{UV} I_M t_{res} \quad (9)$$

Em que o V_{PFR} é o volume útil do reator (cm^3), t_{res} é o tempo de residência da amostra no fotoreator (s), ϑ é a vazão da água no reator ($\text{cm}^3.\text{s}^{-1}$), e K_{UV} é a constante cinética de inativação ($\text{cm}^2.\text{mJ}^{-1}$).

Ressalta-se que a inativação de um número fixo de microrganismos pode ser alcançada em curto intervalo de tempo e alta intensidade ou em tempo longo e baixa intensidade, ou seja, a dose é mantida constante (BARROSO; WOLF, 2009). A Tabela 2 mostra alguns valores de dose para inativar alguns microrganismos.

Tabela 2 – Valores da dose de radiação para inativar alguns microrganismos patogênicos

Microrganismos	Dose necessária ($\mu\text{J}.\text{cm}^{-2}$)	
	Inativação de 90%	Inativação de 100%
Bactérias		
○ <i>Clostridium tetani</i>	12.000	22.000
○ <i>Escherichia coli</i>	3.000	6.600
○ <i>Salmonella enteritidis</i>	4.000	7.600
○ <i>Salmonella typhimurium</i>	8.000	15.200
Protozoários		
○ <i>Giardia lamblia</i>	63.000	-
○ <i>Paramecium sp.</i>	110.000	220.000

Fonte: Modificado BARROSO, WOLF, (2009); DI BERNARDO E DANTAS (2005).

Sabendo disso, Martins (2021) segue a mesma lógica ao apresentar valores para a inativação desses microrganismos, isto é, as bactérias e vírus necessitam de doses de radiação menores comparadas aos protozoários, por exemplo. A Tabela 3 representa os valores das doses de radiação para inativação de alguns microrganismos patogênicos, segundo MARTINS (2021).

Tabela 3 – Valores da dose de radiação para inativar alguns microrganismos patogênicos

Microrganismos	Dose de Radiação $\text{mJ}.\text{cm}^{-2}$
Bactérias	
○ <i>Clostridium tetani</i>	23,1
○ <i>Escherichia coli</i>	6,6

○ <i>Salmonella enteritidis</i>	7,6
○ <i>Salmonella typhi</i>	7,0
Protozoários	
○ Cistos de <i>Giardia lamblia</i>	100,0

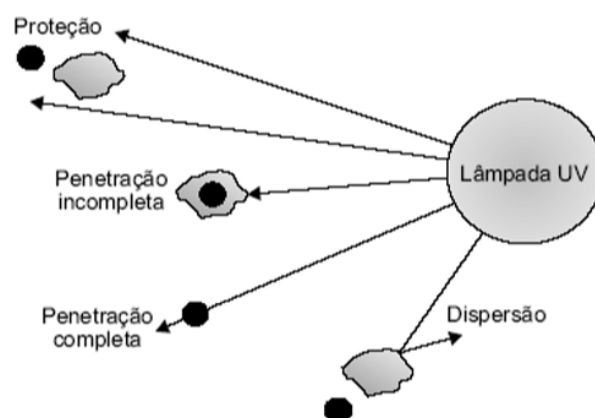
Fonte: Modificado MARTINS (2021).

Percebe-se ainda que esses valores estão acima dos indicados pela Portaria nº 888/2021 para a dose de radiação no processo de desinfecção por radiação ultravioleta, sugerindo que os valores da legislação brasileira sejam brandos comparados aos estudos sobre esse método.

3.4 Qualidade da Água

A qualidade da água é um importante fator a ser analisado da amostra que será desinfetada, já que alguns parâmetros podem interferir negativamente no processo proposto. Como exemplo, a turbidez elevada em algumas amostras de água podem ser um obstáculo na desinfecção ultravioleta, pois a matéria em suspensão impede a penetração da radiação (LOBO, 2008). Tal influência pode ser entendida na Figura 3.

Figura 3 – Influência da matéria em suspensão na desinfecção ultravioleta



Fonte: MARTINS, 2021.

Nota-se, então, que amostras recebem uma dose de radiação diferente a depender do nível de turbidez caracterizada, esclarecendo que é necessário haver um processo de clarificação, ou pré-tratamento, da amostra a ser desinfetada por radiação.

Segundo Martins (2021), outros parâmetros, além do material em suspensão, podem influenciar negativamente a desinfecção UV:

- **Dureza Total:** Altos valores da dureza total promove a falta de solubilidade de alguns metais que podem absorver a luz UV. Além disso, pode ocorrer também incrustações na parede do quartzo, influenciando negativamente no processo de desinfecção;

- **pH:** Altera a solubilidade de metais e carbonatos, promovendo a suspensão desses materiais que podem absorver a luz UV;
- **Sólidos Suspensos Totais (SST):** Absorve a radiação UV e impede, parcialmente, a inativação dos microrganismos patogênicos;
- **Ferro e Manganês:** Absorve a radiação UV promovendo a diminuindo da inativação dos microrganismos patogênicos;
- **Materiais húmicos:** Absorve a radiação UV promovendo a diminuindo da inativação dos microrganismos patogênicos;
- **Cor:** A cor não é um limitante da desinfecção ultravioleta quando determinada de forma isolada, contudo pode estar acompanhada de outros fatores que influenciam o processo, e favorecem o alto valor da cor nas amostras de água, por exemplo ferro, manganês e sólidos em suspensão. A cor de uma amostra de água representa o grau da intensidade que a luz reduz ao atravessa-la, pela presença do material dissolvido (CETESB, 2016). Pode ser determinada como cor aparente, medida com partículas em suspensão, e cor verdadeira, amostras sem turbidez.

Nesse viés, para caracterizar a água a ser desinfetada, é indicado que seja feita uma análise dos critérios de classificação corpo hídrico e do enquadramento, como também pode-se realizar o estudo do Índice da Qualidade da Água, possibilitando entender a amostra a ser trabalhada e, caso necessário promover algum tratamento anterior à desinfecção.

3.4.1 Critérios da Classificação das Águas por enquadramento

A avaliação dos critérios da classificação dos corpos hídricos é realizada para distinguir a qualidade da água necessária para os diferentes destinos do seu uso. Para isso, são levantados alguns parâmetros e com base nos resultados é caracterizado qual o possível destino desse corpo hídrico. No Brasil, esses critérios são definidos na Resolução CONAMA N° 357, de 17 de março de 2005, que legisla sobre águas doces, salobras e salinas, relacionando os parâmetros da qualidade para sua classificação, como pode ser entendido no Artigo 3 da Resolução.

Art.3° 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.

Parágrafo único. 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.

Os corpos hídricos são classificados sob sua qualidade, sendo as águas de natureza doce as únicas indicadas para o consumo humano, segundo a Resolução. O enquadramento é um processo de classificação das águas naturais, levando em consideração alguns fatores como a presença de zonas urbanas ou unidades de conservação em seu curso, por exemplo. Até ser realizado um novo processo de enquadramento, os parâmetros da qualidade de um determinado trecho do corpo hídrico devem ser mantidos dentro de uma faixa. Dessa forma, caso algum parâmetro não esteja compreendido dentro dessa determinada faixa, medidas de intervenção serão necessária para normalizar de tais valores.

As águas doces, segundo a CONAMA nº 357, são classificadas em 5 classes:

- **Classe Especial:** águas destinadas ao abastecimento para consumo humano, após passar por uma desinfecção;
- **Classe 1:** águas destinadas ao abastecimento para consumo humano, após passar por um tratamento simplificado;
- **Classe 2:** águas destinadas ao abastecimento para consumo humano, após passar por um tratamento convencional;
- **Classe 3:** águas destinadas ao abastecimento para consumo humano, após passar por um tratamento convencional ou avançado;
- **Classe 4:** águas destinadas à navegação e/ou harmonia paisagística.

Figura 4 – Classes de enquadramento para o uso da água

USOS DAS ÁGUAS DOÇES		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: ANA – Portal da Qualidade das Águas

3.4.2 Índice de Qualidade de Água

Segundo a Agência Nacional das Águas, o IQA (Índice de Qualidade da Água) foi desenvolvido para caracterizar a qualidade da água bruta, buscando assim adequar o uso para o abastecimento público, após um tratamento específico e adequado. O Índice de Qualidade de Água é um método capaz de relacionar os parâmetros físicos, químicos e biológicos de um determinado corpo d'água com padrões pré-estabelecidos.

O indicador de qualidade é feito mediante 9 parâmetros: temperatura da água, pH, oxigênio dissolvido, Demanda Bioquímicas de Oxigênio (DBO), coliformes termotolerantes, nitrogênio total, fósforo total, sólidos totais e turbidez, listado na Tabela 4. É atribuído um peso para cada parâmetro, mediante sua importância para o cálculo (equação 10). O IQA pode variar de 0 a 100, além de ser mais indicado para corpos que possuem uma certa corrente de água.

Tabela 4 – Parâmetros para o cálculo do Índice de Qualidade de Água

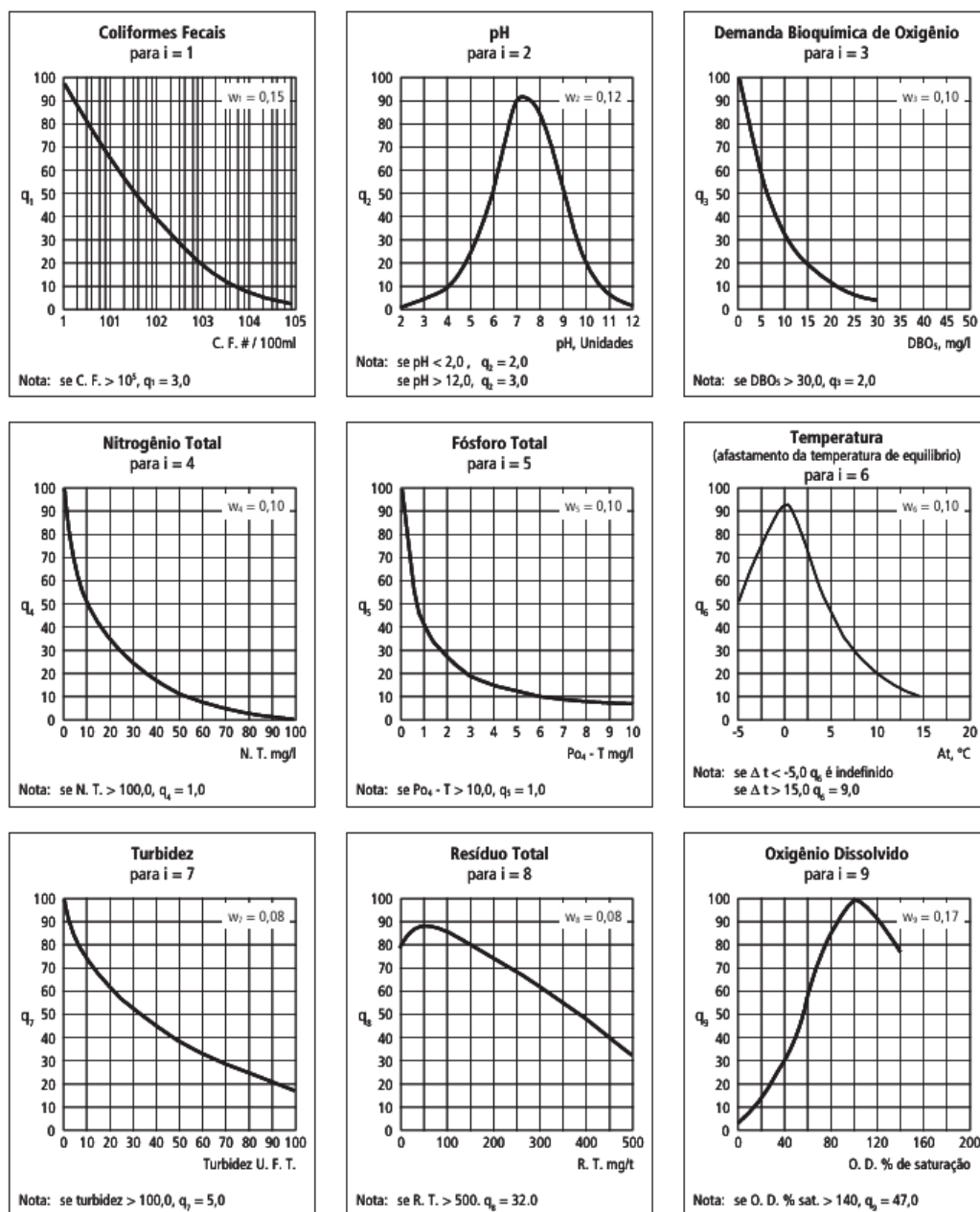
Parâmetro	Peso (w)
Coliformes termotolerantes	0,15
Ph	0,12
Demanda bioquímica de oxigênio	0,10
Nitrogênio Total	0,10
Fósforo total	0,10
Temperatura	0,10
Sólidos totais	0,08
Oxigênio dissolvido	0,17
Turbidez	0,08

Fonte: SANTOS et al, 2018.

Cada parâmetro listado possui um peso (w), e a qualidade analisada e/ou medida (q) é elevada a essa ponderação correspondente. Desse modo, o IQA é determinado multiplicando cada componente (qi^w) (equação 10). Os gráficos apresentados na Figura 5 servem para encontrar o valor de qi .

$$IQA = \prod_{i=1}^n qi^w \quad (10)$$

Figura 5 – Gráficos parametrizados dos fatores do IQA



Fonte: CETESB, 2018.

Os valores do IQA são estratificados por faixas, que variam entre os estados brasileiros. Para o estado da Paraíba, as faixas são as seguintes:

Tabela 5 – Faixas para avaliar a qualidade da água no estado da Paraíba

Faixa para a Paraíba	Avaliação da Qualidade da Água
80-100	Ótima
52-79	Boa
37-51	Razoável
26-50	Ruim
0-19	Péssima

Fonte: ANA – Portal da Qualidade das Águas

Esses parâmetros do IQA formam um método de avaliação da qualidade da água bruta, possibilitando a compreensão da água a ser desinfetada, já que informam as características mais significativas dos corpos d'água. Dessa forma, a seguir, são apresentadas informações desses parâmetros segundo a ANA:

- **Oxigênio Dissolvido:** Águas contaminadas possuem oxigênio dissolvido baixo, dificultando os organismos que vivem em ambientes aquáticos, enquanto águas limpas possuem valores altos. Esse parâmetro reflete a manutenção da vida nos corpos d'água.
- **Coliformes termotolerantes:** Bactérias concentradas, em sua maioria, no trato digestório dos animais, indicando contaminação de origem fecal. A *Escherichia coli* é a principal espécie do grupo, e como ela possui fácil detecção, a quantificação dos coliformes termotolerantes pode ser determinada a partir da contagem da *E. coli*. O número dos termotolerantes pode ser encontrado ao multiplicar a quantidade de *E. coli* por 1,25.
- **Potencial Hidrogeniônico:** Representa as condições ácidas ou alcalinas do corpo d'água por meio da medição da presença de íons hidrogênio (H^+). Variações no pH da água podem favorecer a precipitação de alguns elementos, muitos deles tóxicos para os organismos da água, além de deixá-la imprópria para o abastecimento público.
- **Demanda Bioquímica de Oxigênio:** A DBO representa a quantidade de oxigênio para oxidar a matéria orgânica presente em uma amostra de água através da decomposição microbiana aeróbia, e difere da Demanda Química de Oxigênio (DQO) que oxida tanto a matéria orgânica como a inorgânica. Dessa forma, a DBO sempre será menor que a DQO. Altos valores de DBO, assim como a DQO, representam contaminação excessiva na água, indicando o recebimento de esgotos domésticos ou efluentes de criatórios de animais.
- **Temperatura da água:** A temperatura da água, fora de um limite padrão, influencia diretamente os organismos que são termotolerantes, causando impactos na reprodução, por exemplo. A variabilidade da temperatura da água ocorre por fenômenos naturais, como as estações do ano, ou por fontes de contaminação, como os efluentes industriais.
- **Nitrogênio Total:** O nitrogênio total é a soma dos teores de nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal e nitrogênio orgânico, sendo o nitrato o indicador de contaminação por efluentes de origem animal e industriais. Além disso, junto com o fósforo, pode causar o crescimento de algas e iniciar o processo de eutrofização.

- **Fósforo Total:** Importante parâmetro para a caracterização do processo biológico dos corpos d'água, possibilitando o crescimento de algas, encontrados em altas concentrações. Assim como o nitrogênio, uma das fontes do fósforo é da própria matéria fecal, como também a presença dos detergentes superfosfatados.
- **Turbidez:** A turbidez, como já citado, é a suspensão dos materiais nos corpos d'água, dificultando a passagem até mesmo da luz natural, desregulando processo básico como a fotossíntese. Além de afetar alguns organismos aquático, amostras com altos valores de turbidez ocasiona no uso mais atenuado de coagulante nos tratamentos que a água é submetida, quando destinada ao abastecimento.
- **Resíduo Total (ST):** resultado da matéria pós evaporação e secagem. Os sólidos totais podem também aumentar o risco de enchentes, quando depositados no leito dos corpos d'água.

3.5 Processos de Tratamento da água

Para produzir uma água segura destinada ao consumo humano é fundamental promover alguns processos para torná-la potável, removendo patógenos, substâncias químicas nocivas e eliminando turbidez, cor, gosto e odor (BRASIL, 2006). Os processos, aplicáveis à água bruta geralmente, auxiliam o tratamento da água precedem a desinfecção, como a coagulação e filtração.

3.5.1 Coagulação

A coagulação é um método que consiste em submeter uma desestabilização nas partículas presentes nas amostras de água, por ação de coagulantes, promovendo a decantação dessas após elas se aglomerarem. Essas partículas promovem cor e turbidez na água, e removendo-as haverá um processo conhecido como clarificação.

Sabe-se também que há uma relação entre a presença dos microrganismos patogênicos com a quantidade de partículas nas amostras de água. Dessa forma, o processo de coagulação promove uma diminuição na densidade de microrganismo na água (LIBÂNIO, 2010).

O processo da coagulação deve ser aplicado em duas fases: agitação rápida e agitação lenta. A agitação rápida busca distribuir de forma homogênea o coagulante por toda a amostra, enquanto a agitação suave é necessária para promover a agregação das partículas, formando os coágulos e iniciando a floculação, seguida pela decantação. O pH é um importante fator para ser analisado durante o processo, pois influencia na formação dos coágulos (LIBÂNIO, 2010).

3.5.2 Filtração

A filtração é um processo importante no tratamento de água, visto que essa operação visa separar materiais suspensos de uma amostra de água destinada à desinfecção, além de corrigir possíveis falhas ocorridas nas etapas de coagulação e decantação. Para Bastos e Afonso (2015), a filtração é uma técnica aplicada na separação desses sólidos suspensos de meios líquidos. Trata-se essencialmente de uma separação por permeação, onde o sólido é separado do líquido fazendo a mistura passar através de uma superfície porosa, chamada meio filtrante.

A eficiência desse processo é caracterizada e pode ser influenciada por alguns fatores, incluindo os parâmetros físicos e químicos 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).

A filtração pode ser classificada como filtração rápida e filtração lenta, tendo como a principal diferença a taxa de filtração aplicada e a granulometria do meio filtrante utilizado. Para cor e turbidez com valores relativamente baixos pode-se indicar um processo por filtração rápida, contudo é necessária realização de pré-tratamentos, os quais são determinados por meio da qualidade da água escolhida para o abastecimento (BURGARDT, 2015; DI BERNARDO & DANTAS, 2005).

4 METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Cromatografia e Quimiometria Aplicada (LACQUA), no Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Os ensaios de desinfecção por radiação ultravioleta foram realizados em reator batelada e em reator de fluxo contínuo. Nos experimentos em reator batelada, objetivou-se avaliar a influência da turbidez remanescente na água (após tratamento físico-químico), na eficiência de inativação das bactérias *E. coli*.

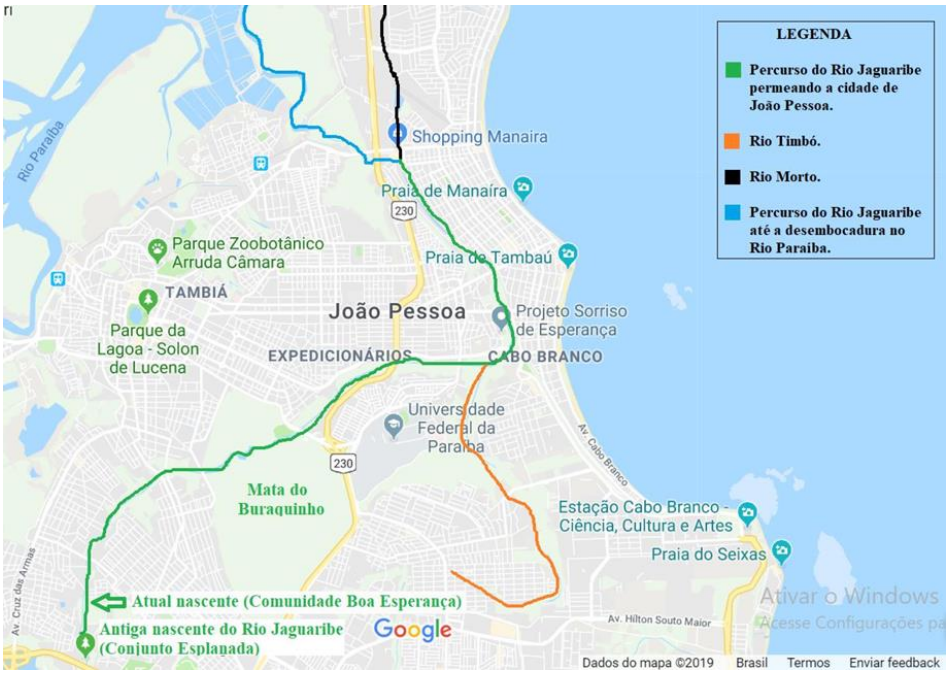
Nos experimentos realizados em sistema de fluxo contínuo, avaliou-se a eficiência de inativação das bactérias *E. coli* e de Esporos de Bactérias Aeróbias (EBA) aplicando dosagens menores de radiação ultravioleta, bem como aplicar a desinfecção no ponto de uso, ou seja, de uma água tratada, com turbidez atendendo ao exigido pela Portaria.

4.1 Caracterização da área de estudo e dos pontos de coleta

Os ensaios de desinfecção foram realizados em amostras de água coletadas na Bacia Hidrográfica do rio Jaguaribe. Com aproximadamente 21 km de extensão, o rio Jaguaribe originalmente nascia no bairro Ernani Sátiro, porém esta nascente foi aterrada para construção do Conjunto Residencial Esplanada, passando a cabeceira a se localizar às margens da BR-230, próximo à Comunidade Boa Esperança, área ao sul da cidade. À jusante de sua nascente, o rio Jaguaribe segue no sentido oeste-leste e é alimentado por riachos e pequenos córregos, passa pela Mata do Buraquinho, no Jardim Botânico, até encontrar seu principal afluente, o riacho Timbó, em sua margem direita. Este riacho nasce entre os bairros de Jardim Cidade Universitária e Portal do Sol e encontra o rio Jaguaribe na planície litorânea da praia de Cabo Branco.

A seguir, o rio Jaguaribe continua em direção ao norte até o Shopping Manaíra, onde sofre uma bifurcação. Parte do rio foi canalizada e passa sob o estacionamento do Manaíra Shopping, em direção ao norte, e a outra parte segue para oeste, por baixo da rodovia BR-230, até **desaguar no manguezal do rio Mandacaru**, afluente do rio Paraíba. Sua desembocadura original se localiza no Oceano Atlântico, no Maceió entre os bairros do Bessa e de Intermares. Ao trecho entre a antiga foz e a nova, foi dado o nome de **Rio Morto**, o qual possui uma extensão de aproximadamente 5,5 km, seguindo, com baixa energia, no sentido sul-nordeste, até desaguar no mar. A Figura 6 mostra o percurso do Rio Jaguaribe atravessando o município de João Pessoa.

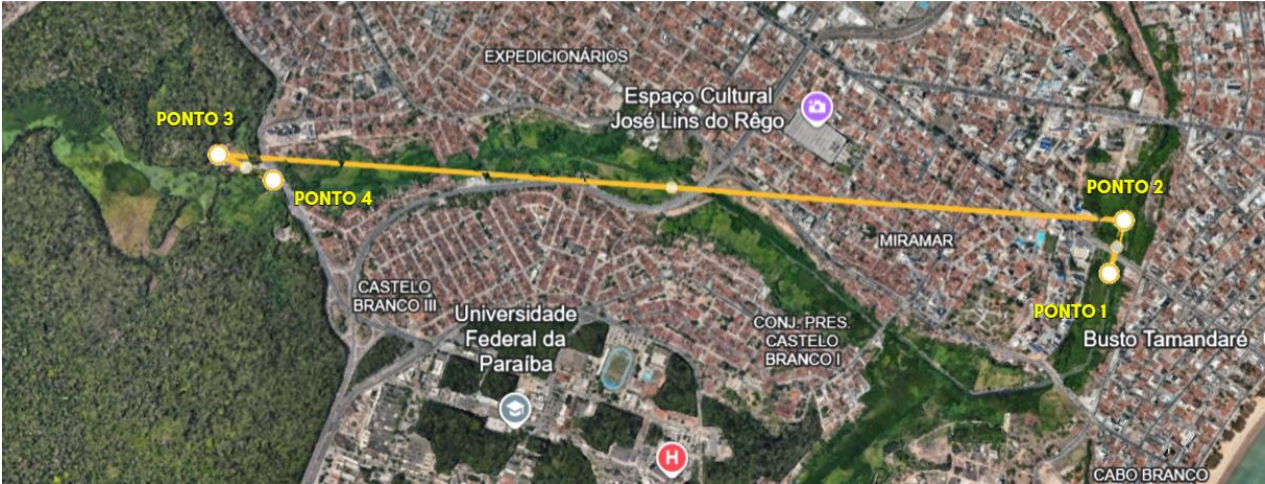
Figura 6 – Curso do rio Jaguaribe



Fonte: DE FARIAS, 2019.

Para realização dos ensaios de desinfecção, as amostras foram coletadas em diferentes pontos do rio Jaguaribe, como destacado na Figura 7 e descrito na Tabela 6.

Figura 7 – Pontos de coleta das amostras para os ensaios da desinfecção em batelada



Fonte: modificado GOOGLE EARTH, 2025.

Tabela 6 – Detalhes da coleta e tratamento da amostra para a desinfecção em batelada

Coletas	Georreferenciamento	Data	Sistema de Desinfecção por Radiação Ultravioleta	Observações
Ponto 1	-7.119708 -34.830827	11/11/2024	Reator Batelada	Pouca quantidade de água, com odor forte e cor não elevada.
Ponto 2	-7.118111 -34.831544	05/12/2024	Reator Batelada	Baixa quantidade de água, muita vegetação superficial, além de forte odor e cor moderada.
Ponto 3	-7.136269 -34.860827	13/12/2024	Reator Batelada	Água com odor forte, mas cor não elevada
Ponto 4	-7.135439 -34.858326	10/03/2025	Reator Contínuo	Água com boa vazão, sem odor e cor moderada

Fonte: Autor.

A Figura 8 mostra as coletas realizadas nos pontos descritos na Tabela 6.

Figura 8 – Coletas da água bruta para os ensaios da desinfecção ultravioleta:
a) Ponto 1; b) Ponto 2; c) Ponto 3; Ponto 4

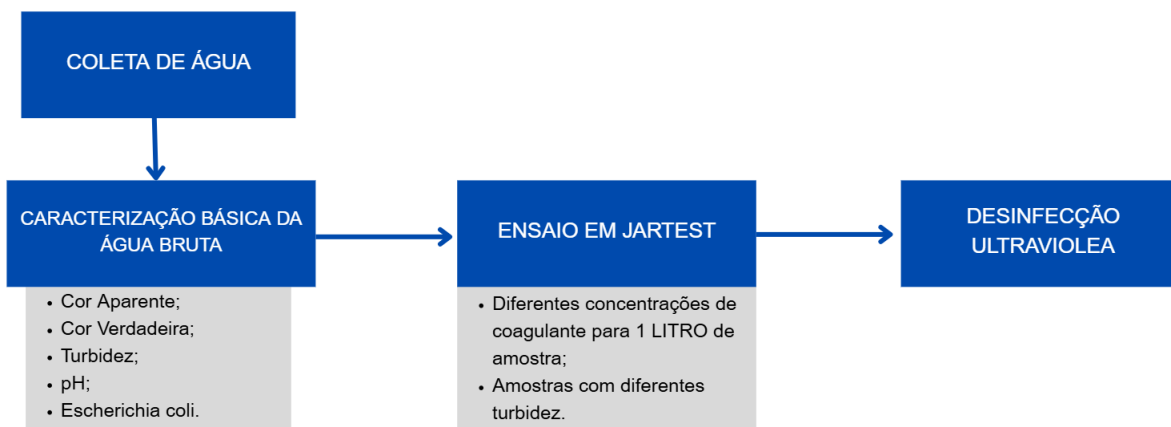
Fonte: Autor.

Além disso, a amostra de água coletada para o teste da desinfecção ultravioleta no ponto de consumo (POU), realizado em fluxo contínuo, foi escolhido baseado no monitoramento da qualidade da água do Campus I da UFPB, feito pelo próprio LACQUA. Após determinar a presença da contaminação microbiológica em um dos pontos de análise, foi realizada a coleta da amostra de água. Neste caso, a amostra utilizada foi coletada na cozinha da residência universitária, em João Pessoa.

4.2 Desinfecção por radiação em Reator Batelada

Para os ensaios de desinfecção em reator batelada, as amostras de água bruta coletadas no rio Jaguaribe, foram submetidas a um tratamento preliminar de coagulação, floculação e decantação, com diferentes dosagens do coagulante sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$). Com isso, obtiveram-se amostras (de água decantada) com diferentes valores de turbidez, as quais foram submetidas aos ensaios de desinfecção. A Figura 9, mostra um fluxograma contendo as etapas que antecedem o processo de desinfecção por radiação ultravioleta.

Figura 9 – Fluxograma das atividades realizadas para a desinfecção em batelada



Fonte: Autor.

Para obter 1 litro de amostra a ser desinfetada com diferentes valores de turbidez, foram aplicadas duas concentrações diferentes do sulfato de alumínio para a água coletada do ponto 1, duas concentrações diferentes com a água coletada do ponto 2 e uma concentração do coagulante na amostra coletada do ponto 3. A Figura 10 mostra as amostras em processo de decantação.

Figura 10 – Amostra em processo de coagulação-decantação



Fonte: Autor.

Após a coagulação e decantação, foi adicionado 1 litro do sobrenadante da amostra no reator. O processo consistia em coletar alíquotas, com uma pipeta volumétrica de 50 mL, no tempo 0, 30, 90, 150 e 210 segundos de reação. Para evitar/minimizar a contaminação cruzada, a pipeta para essas coleta era higienizada com água destilada durante os intervalos de tempo. Por conta da disponibilidade dos reagentes da análise microbiológica, não foi possível coletar alíquotas no último tempo de reação citado das amostras do ponto 3.

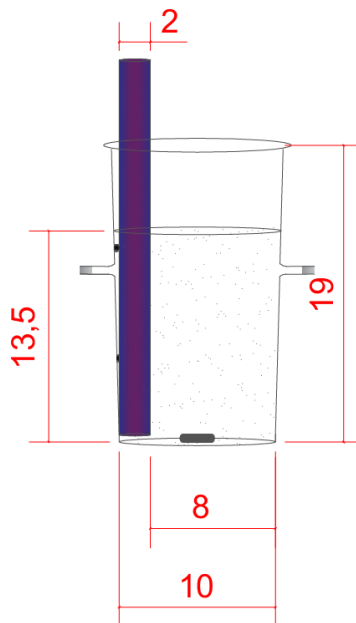
Para cada intervalo de tempo, eram analisados os seguinte parâmetros:

- Cor verdadeira;
- Turbidez;
- pH;
- Absorbância em 254nm;
- Análise microbiológica (*Escherichia coli*).

4.2.1 Sistema da desinfecção

O sistema para a desinfecção em batelada consistia em um béquer de 1250 mL, com as saídas laterais isoladas, sobre um agitador mecânico, ligado durante todo o processo. O reator tem um diâmetro de 10 cm e uma coluna de líquido de 13,5 cm, para 1 litro de amostra. Sendo assim com uma área de 424,12 cm². A Figura 11 é uma representação do sistema.

Figura 11 – Desenho do sistema de desinfecção em batelada



Fonte: Autor.

A lâmpada germicida, com duas ventosas fixas na parede do reator, ficou submersa na água a ser desinfetada, proporcionando uma lâmina lateral de líquido de 8 cm. Para manusear o equipamento e coletar as alíquotas em segurança, o sistema era coberto por uma caixa, revestida com papel alumínio em todo o interior, com uma pequena porta frontal. O sistema é apresentado na figura 12.

Figura 12 – Sistema da desinfecção em batelada



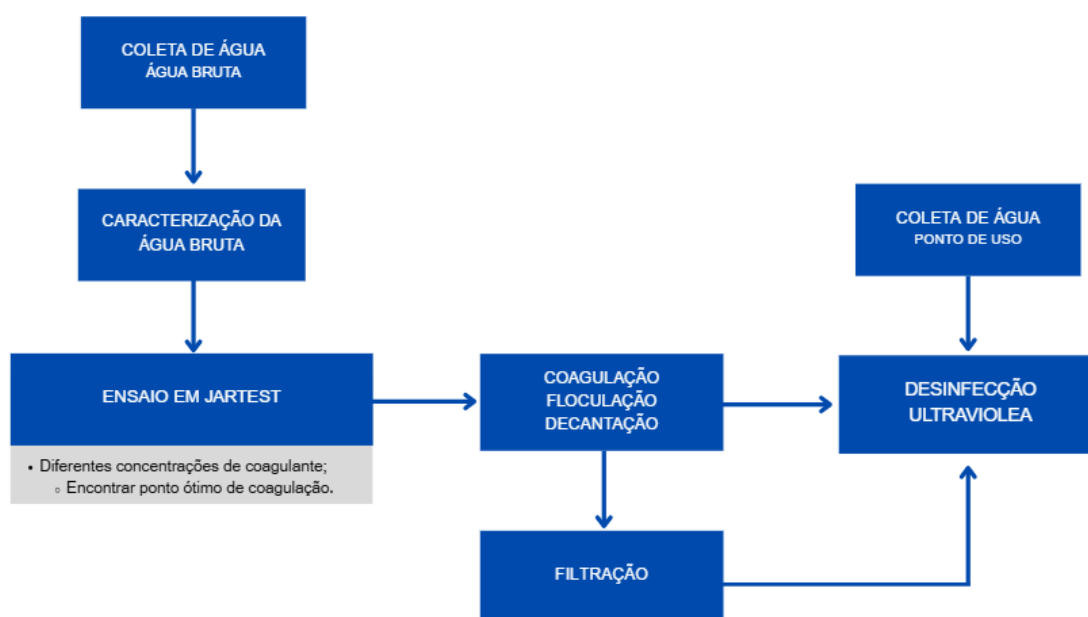
Fonte: Autor.

A lâmpada germicida utilizada possui um diâmetro de 2,0 cm e comprimento de 24 cm. Além disso, possui 13W de potência na faixa do visível, e seguindo o estudo de MARTINS (2021), foi considerado 30% de emissão na faixa UV-C (254nm), resultando em uma potência de 3,9 W. A lâmpada era ligada 30 minutos antes de iniciar o processo, para obter a temperatura ideal para ser realizada a desinfecção.

4.3 Desinfecção por radiação em Reator em Fluxo Contínuo

Para os ensaios de desinfecção por radiação ultravioleta em reator contínuo, foi realizada uma coleta de água bruta no rio Jaguaribe e uma coleta de água tratada (POU) na UFPB. A Figura 13 mostra o fluxograma das atividades realizadas antes do processo da desinfecção.

Figura 13 – Fluxograma das atividades realizadas para a desinfecção de fluxo contínuo



Fonte: Autor.

Considerando alguns fatores como a facilidade da coleta e do deslocamento, proximidade do laboratório e melhor segurança, o ponto escolhido foi na ponte da avenida Dom Pedro II, como foi mostrado na Tabela 6 desse capítulo. Essa localização é justamente no trecho do rio na saída do jardim botânico Benjamin Maranhão, com uma baixa urbanização no entorno. Com isso, foi coletado 40 litros de água nesse trecho no dia 10 de março de 2025.

Para o fluxo contínuo, foi realizada a caracterização completa da água bruta (fatores físico-químicos, metais e microbiológicos), com o objetivo de estudar os aspectos que podem limitar o método da desinfecção ultravioleta, além observar o comportamento desses fatores durante o processo de tratamento. Essa caracterização serviu também para determinar o Índice de Qualidade da Água.

Para o ensaio em Jar Test, foram propostas 3 concentrações do sulfato de alumínio: 40 mg/L, 60 mg/L e 80 mg/L, em 600 mL da amostra bruta, representado na Figura 14. A escolha da concentração ideal para o processo de coagulação é aquela que resultaria no maior decaimento da turbidez e da cor aparente e verdadeira para o tratamento da água.

Figura 14 – Ensaio em Jar Test para o processo contínuo



Fonte: Autor

Após a determinação do ponto ótimo da concentração do sulfato de alumínio, foi proposta uma coagulação de 25 litros de água bruta. Esse processo foi dividido em dois momentos: primeiro uma coagulação em 15 litros, e após a decantação segue para a desinfecção ultravioleta. Já no segundo momento, foi realizada a coagulação e decantação de 10 litros da água bruta, para em seguida submeter todo o volume a uma filtração simples em papel filtro, promovendo um decaimento ainda maior da turbidez para posteriormente seguir com a desinfecção UV. Para comparar a água após o tratamento convencional com a amostra de água bruta, foi estudado também o IQA da água decantada. A Figura 15 mostra o sistema usado para a coagulação e o processo da filtração.

Figura 15 – Sistema mecânico utilizado para coagulação e o sistema de filtração



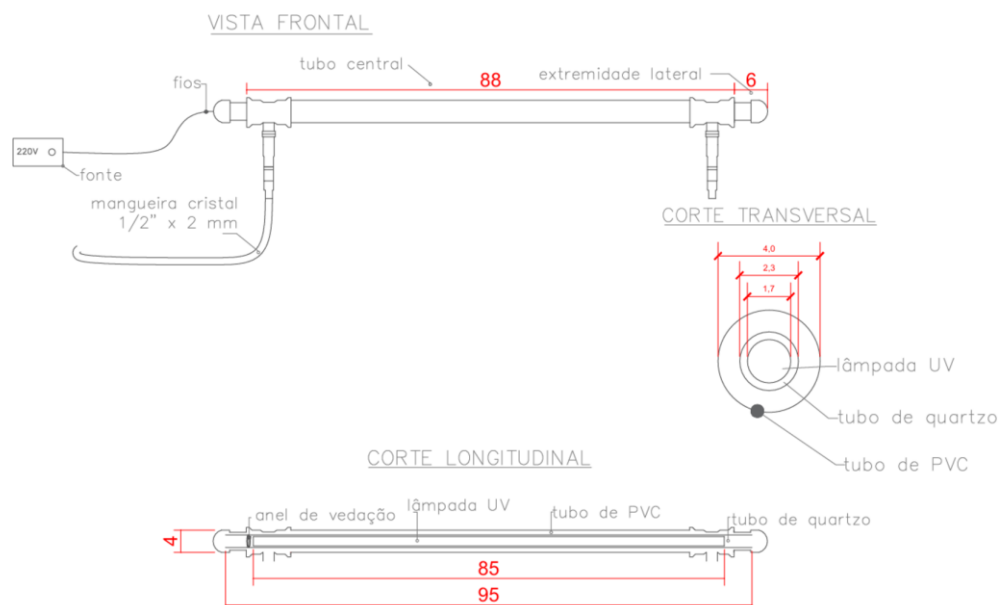
Fonte: Autor.

Para o processo de desinfecção, tanto para a amostra decantada quanto para filtrada, foram colocados no tanque de entrada do reator 8 litros, mas apenas 5 litros foram tratados. Como a bomba utilizada é do tipo submersa é necessário a presença de água para haver a passagem pelo reator, e essa diferença de volume permite que o tanque de entrada seja abastecido apenas no início do processo, reduzindo uma possível turbulência nos resultados caso encontrasse a necessidade de abastecer durante a passagem a única da desinfecção.

4.3.1 Reator contínuo

O sistema para a desinfecção contínua foi projetado para operar de forma tubular, do tipo PFR (Plug Flow Reactor) utilizando o material do tipo PVC, com comprimento total de 100,0 cm. A Figura 16 representa o sistema construído para a desinfecção contínua.

Figura 16 – Desenho do reator para desinfecção contínua



Fonte: Autor.

O tubo central possui 88,0 cm de comprimento e um diâmetro de 4,0 cm, enquanto os dois encaixes laterais possuem 6,0 cm de comprimento e 3,2 cm de diâmetro. A fixação do reator é feita por duas presilhas que envolvem o tubo central com braçadeiras ajustáveis. Além disso, no interior do reator há um tubo de quartzo com diâmetro de 2,3 cm e 94 cm de comprimento. Pode-se observar também que foram colocados 3 anéis de vedação de borracha, o que impede a passagem da água que entra no equipamento para a parte elétrica do reator, possibilitando obrigatoriamente que a amostra ser desinfetada seja conduzida ao caminho da lâmpada germicida. A lâmina de líquido do reator é de 0,85 cm, calculado pela diferença do diâmetro do tubo central e do tubo de quartzo. O volume útil do reator será pode ser encontrado pela diferença do volume da casca do reator pelo volume do quartzo, seguindo a equação 11:

$$V_{\text{útil}} = V_{\text{CASCA}} - V_{\text{QUARTZO}} \rightarrow V = \pi . \text{raio}^2 . \text{comprimento} \quad (11)$$

Como é possível observar no desenho do reator, o volume da casca compreende todo o comprimento de 88,0 cm com 4,0 cm de diâmetro, como a pequena parte de 6,0 cm de comprimento e diâmetro de 3,2 cm. Diante dos valores e substituindo na equação 11, têm-se:

Tabela 7 – Volume útil do reator contínuo

Volume da casca	1154,0 cm ³
Volume do quartzo	392,6 cm ³
Volume útil do Reator	761,4 cm ³

Fonte: Autor.

A área total do reator é soma da área do tubo central e de apenas uma extremidade lateral que passa a água ser desinfetada, e substituindo os valores na equação 12, é determinado um valor total de 1166,1 cm².

$$A_{\text{total}} = A_{\text{central}} + A_{\text{lateral}} \rightarrow A = \pi . \text{diâmetro} . \text{comprimento} \quad (12)$$

Para o reator contínuo, a lâmpada germicida utilizada foi da marca OSRAM. Possui um diâmetro de 1,7 cm e comprimento de 85 cm. Além disso, a lâmpada tem uma potência de 36 W, e a empresa fornecedora indica que na faixa do UV-C possui 14 W. Por possui 4 pinos na mesma extremidade, possibilitou que toda a parte elétrica fosse projetada apenas para esse lado, assim como o tubo de quartzo, feito para ser aberto apenas em uma extremidade. Para promover a passagem da água através do reator, foi usada uma bomba com vazão máxima de 530 L/h. A estrutura e os materiais que compõem o sistema de desinfecção podem ser observados na Tabela 8 e Figura 17.

Tabela 8 – Materiais utilizados no equipamento

Materiais	Quantidade
Tubo de Água de 40 mm	1
Tubo de Água de 32 mm	2
Turbo de Quartz	1
Tê de 40 mm	2
Terminal cabeça 32 mm	2
Anel de Redução 40 mm para 32 mm	2
Adaptador rosca externa de 25 mm	2
Adaptador rosca externa de 20 mm	2
Adaptador rosca interna de 25 mm	2
Bucha de redução 25 para 20 mm	2
Lâmpada germicida	1
Anel de Vedação	3
Mangueira	1
Bomba submersa	1

Fonte: Autor.

Figura 17 – Sistema construído para a desinfecção ultravioleta por fluxo contínuo



Fonte: Autor

4.4 Teste da Desinfecção no Ponto de uso

Para a realização do teste da desinfecção ultravioleta no ponto de uso foi coletada a amostra de água no dia 02 de abril de 2025 na cozinha da residência universitária da UFPB, após a confirmação da presença de contaminação microbiológica, feita pelo monitoramento do laboratório. A Figura 18 mostra a coleta da amostra.

Figura 18 – Coleta da amostra na residência universitária para desinfecção UV no ponto de uso



Fonte: Autor.

Para a realização da desinfecção foram coletados 5 litros de água, mas apenas 2 litros foram desinfetados, possibilitando que o recipiente de entrada não esvazie, já que a bomba usada é do tipo submersa. Sendo uma desinfecção já no ponto de consumo, não houve um pré-tratamento da amostra, seguindo logo para a desinfecção.

Com o objetivo de diminuir o tempo de residência, para avaliar menores valores da dose de radiação, a bomba usada nesse ensaio possui uma potência máxima de 900 L/h. Os parâmetros determinados da amostra na entrada do reator foram os seguintes:

- Cor Verdadeira;
- pH;
- Turbidez;
- Absorbância em 254 nm;
- Cloro total;
- Análise Microbiológica.

4.5 Limpeza do reator contínuo

Entre as operações no reator contínuo, foi utilizado um mecanismo de limpeza com o objetivo de minimizar uma possível contaminação cruzada. Foi submetido um volume de 1,5 litro de água destilada a um processo de ozonização por 7 minutos. Após isso, a água ozonizada ficou em reciclo por 30 minutos, com a luz UV ligada. Esse processo pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – Processo de limpeza do reator

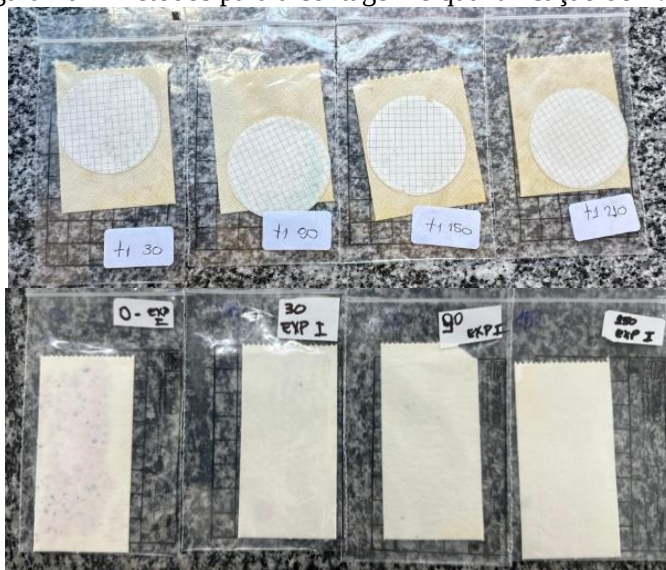


Fonte: Autor.

4.6 Análise Microbiológica

Para ser feita a diferenciação e contagem da bactéria *Escherichia coli*, foram utilizados dois métodos por **meio cromogênico**: filtração em membranas e absorção da amostra por balneabilidade direto no meio de cultivo.

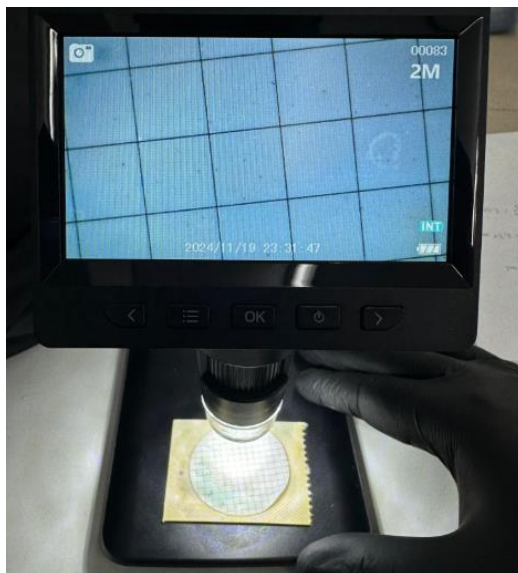
Para o primeiro processo, foram realizadas soluções com amostras diluídas em 100 mL para filtração a vácuo na membrana de acetato de celulose com porosidade de 0,45 μm (Colipaper PETRI/ALFAKIT). Após isso, a membrana era colocada sobre um meio de cultura cromogênico e colocada na incubadora a 35°C por 18 horas. Para o segundo processo, foi utilizado a técnica de balneabilidade, inserindo o meio de cultura cromogênico diretamente na amostra (Colipaper/ALFAKIT). Em seguida, o meio com a amostra era colocado na incubadora a 35°C por 15 horas. A Figura 20 mostra os dois métodos de quantificação.

Figura 20 – Métodos para a contagem e quantificação de *E. coli*

Fonte: Autor.

Para os dois processos, após o período de incubação, foi realizada a identificação e a contagem dos microrganismos, em que as colônias azuis formadas foram contabilizadas como *Escherichia coli*. Para essa contagem foi utilizado um microscópio digital (Figura 21). Os resultados, para ambos os métodos, foram expressos em Unidades Formadoras de Colônia (UFC) por 100 mL de amostra.

Figura 21 – Contagem dos microrganismos no microscópio



Fonte: Autor.

A quantificação dos Esporos de Bactérias Aeróbios foi realizada seguindo o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (24^a ed). Inicialmente foi realizado um tratamento térmico em banho-maria das amostras em 80°C por 10 minutos, em que nesta condição as células vegetativas são mortas e as bactérias que formam esporos irão esporular. Foi preparado o meio de cultivo com peptona, extrato de carne, azul de tripano e ágar, mostrado na Figura 22.

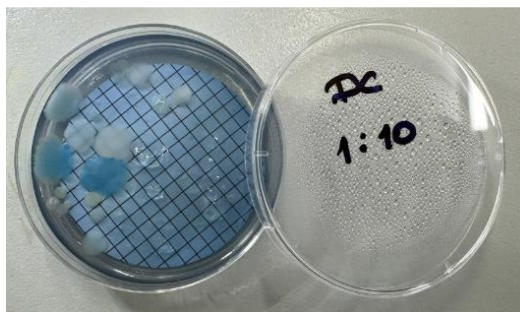
Figura 22 – Meio de cultura na autoclave e tratamento térmico das amostras em banho-maria



Fonte: Autor.

As amostras eram diluídas em 100 mL, após o banho-maria, e eram filtradas a vácuo em uma membrana de acetato de celulose com porosidade de 0,45 μ . Em seguida, a membrana era colocada em uma placa de petri (60x15mm) junto com o meio de cultivo e incubada a 35°C por 24 horas. Todas as colônias bacterianas formadas eram consideradas EBAs. A Figura 23 representa o ensaio para quantificação dos esporos.

Figura 23 - Cultivo dos esporos de bactérias aeróbias



Fonte: Autor.

Para a realização das análises físico-químicas, os métodos seguidos para caracterização das amostras estão listados na Tabela 9:

Tabela 9 - Métodos aplicados para as análises microbiológicas

Parâmetro	Referencial Metodológico	Unidade/Resultado
<i>Escherichia coli</i>	Meio cromogênico para contagem de <i>E. coli</i> pela técnica da membrana filtrante. ⁽¹⁾	UFC/100mL
	Meio cromogênico com peptona e cloreto de sódio para identificação por absorção. ⁽²⁾	
Esporos de Bactérias Aeróbias	Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 24ª ED., 9218 B	UFC/100mL
Colilert	Aquateste coli, indicador cromogênico ONPG e o indicador fluorogênico MUG	Presença/Ausência

(1) Ensaio realizado para contagem de microrganismos por filtração;

(2) Ensaio realizado para contagem de microrganismos por Balneabilidade.

Fonte: Autor.

4.7 Inativação microbiológica

A quantificação da eficiência da inativação microbiológica é feita em escala logarítmica, como é estipulado pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Nesse sentido, a inativação dos indicadores de contaminação *Escherichia coli*, coliformes totais e esporos de bactérias aeróbias serão apresentadas nessa escala, possibilitando uma comparação dos resultados alcançados nesse estudo com os propostos pela legislação.

O cálculo da inativação é realizado seguindo a seguinte equação:

$$Inativação = \log \frac{N_0}{N} \quad (13)$$

Em que: N_0 representa a contagem inicial de colônias da amostra, e N a contagem de microrganismos após uma certa exposição à energia ultravioleta.

4.8 Análises físico-químicas

Para a realização das análises físico-químicas, os métodos seguidos para caracterização das amostras estão listados na Tabela 10:

Tabela 10 – Métodos aplicados para as análises físico-químicas

Parâmetro	Referencial Metodológico	Unidade
Ferro	MÉTODO DO TIOCIANATO - Reagente Alfakit.	mg/L
	(Análisis Del Agua. E. Merck. Darmstand. Alemanha. Pg. 114)	
Manganês	MÉTODO DA FORMALDOXIMA - Reagente Alfakit. (FRIES, J. GETROST, H. Organic Reagents for TraceAnalysis, MERCK; 1977 pg. 236)	mg/L
Alumínio	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22º Ed. 2012. 3500 B. 3-61	mg/L
Fósforo	Calculado a partir da quantidade de fósforo obtida na análise de fosfato.	mg/L
	[MÉTODO DO ÁCIDO ASCÓRBICO - Reagente Alfakit. (Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 23º Ed. 4500-P.E).]	
Dureza Total	Adaptado de Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 23ª ED., 2340 C	mg/L

Cloreto	Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 23° Ed, 4500-Cl- B.	mg/L
Demanda Bioquímica de Oxigênio	Adaptado de Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 23ª ED. 5210 B	mg O ₂ /L
Demanda Química de Oxigênio	Adaptado de Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 23ª ED. 5220 C	mg O ₂ /L
MÉTODO DA DIGESTÃO COM PERSULFATO		
Nitrogênio Total	- Reagente Alfakit. (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23° Ed., 4500-N C).	mg/L
Oxigênio Dissolvido	Leitura direta por aparelho portátil.	mg O ₂ /L
Cor Aparente	Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 23ª ED. 2120 C	mg Pt-Co/L
Cor Verdadeira	Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 23ª ED. 2120 C	mg Pt-Co/L
Condutividade	Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 23ª ED. 2510 B	µS/cm
Salinidade	Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 23ª ED. 2520 B	ppm
Sólidos Totais	Adaptado de Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 23ª ED. 2540 B	mg/L
pH	Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 23ª ED. 4500-H ⁺ B	-
Temperatura	Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 23ª ED. 2550 B	°C
Turbidez	Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater, 23ª ED. 2130 B	NTU
Cloro	Método DPD - Standard Methods for the Examination of WaterandWastewater, 23° Ed., 4500-Cl G.	mg/L

Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Desinfecção por radiação ultravioleta em Reator Batelada

As características das amostras da água bruta e tratada, após o tratamento físico-químico de coagulação, floculação e decantação, estão resumidas na tabela a seguir:

Tabela 11 – Caracterização das amostras da água bruta e da água tratada

Ponto de Coleta	ÁGUA BRUTA				Conc. do Coagulante mg.L ⁻¹	ÁGUA TRATADA			
	Turbidez (uT)	Cor verdadeira (mg Pt-Co/L)	pH	<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 mL)		Turbidez (uT)	Cor verdadeira (mg Pt-Co/L)	pH	<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 mL)
Ponto 1 11/11/24	10,2	109,6	7,07	6,80 x 10 ³	60	1,83	10,7	7,19	3,80 x 10 ³
					80	1,26	7,1	7,05	3,03 x 10 ³
Ponto 2 05/12/24	18,0	115,9	7,08	-	40	3,82	50,6	7,13	3,52 x 10 ⁴
					100	0,97	3,5	7,00	5,60 x 10 ⁴
Ponto 3 13/12/2024	7,23	54,2	7,22	1,56 x 10 ⁴	0	7,23	54,5	7,22	1,56 x 10 ⁴
					10	4,82	50,6	7,43	9,75 x 10 ³

Fonte: Autor.

Ao observar os dados, percebe-se que o processo da coagulação da água bruta foi eficiente, alcançando o objetivo de obter diferentes valores de turbidez das amostras de água tratada (amostras a serem desinfetadas) para analisar a influência desse fator no processo da desinfecção ultravioleta. É possível observar que o ponto 3 possui uma qualidade da água bruta melhor que os outros pontos, para os parâmetros cor verdadeira e turbidez, no entanto possui uma contagem das bactérias *Escherichia coli* maior que o ponto 1. Com relação ao processo de clarificação das amostras de água bruta, nota-se para o ponto 3 foi realizado apenas um processo físico-químico (com 10 mg.L⁻¹), promovendo nesse caso a desinfecção por radiação de uma amostra da própria água bruta. Para o ponto 1, foi alcançada uma remoção de 82,0% e 87,6% da turbidez, para as concentrações de 60 mg.L⁻¹ e 80 mg.L⁻¹, respectivamente. Já para o ponto 2, a coagulação com concentração de 40 mg.L⁻¹ proporcionou uma remoção da turbidez de 78,8%, enquanto a coagulação com a concentração de 100 mg.L⁻¹ atingiu uma remoção de 94,6% da turbidez. Para o fator cor verdadeira, após a coagulação, as amostras obtiveram remoção que variaram entre 6,6% e 97,0%.

As amostras da água tratada obtidas após o processo físico-químico, ou seja, as amostras de água que irão alimentar o sistema de desinfecção por radiação ultravioleta, apresentaram valores de turbidez entre 0,97 uT e 7,23 uT, e a concentração das bactérias *Escherichia coli* entre $3,03 \times 10^3$ UFC/100mL e $5,60 \times 10^4$ UFC/100mL. Vale destacar que este último valor é referente a amostra de água coletada no ponto 2. Na coleta, o rio Jaguaribe apresentava uma baixa vazão e alta vegetação superficial, favorecendo uma contagem considerável das bactérias. A cor verdadeira possui uma grande de variação, com valores entre 3,48 e 54,53 mg Pt-Co/L.

A Tabela 12 mostra os resultados obtidos para o estudo da inativação em reator batelada, para as amostras de água com diferentes valores de turbidez, evidenciando o comportamento da diminuição da fração da *E. coli* em função da turbidez e da dose de radiação. É indicado também na tabela valor da remoção das bactérias em escala logarítmicas. A intensidade média efetiva (I_M) é calculada seguindo a equação 3, substituindo os valores da absorbância em 254 nm e o valor da lâmina de líquido do reator em batelada (de 8,0 cm).

Tabela 12 – Desinfecção em batelada das amostras para os diferentes valores de turbidez

Turbidez uT	Tempos s	I_0 mW.cm ⁻²	Abs 254	I_M mW.cm ⁻²	Dose de Radiação mJ.cm ⁻²	Fração de <i>E. coli</i>	% Inativação	Ln Inativação	Log N ₀ /N
0,97	0	9,20	0,071	7,02	0,0	1,000	0%	0,000	-
	30				210,7	0,429	57%	0,847	0,37
	90				632,0	0,286	71%	1,253	0,54
	150				1053,3	0,143	86%	1,946	0,85
	210				1474,6	0,071	93%	2,639	1,15
1,26	0	9,20	0,099	6,36	0,0	1,000	0%	0,000	-
	30				190,9	0,462	54%	0,773	0,34
	90				572,7	0,099	90%	2,314	1,00
	150				954,4	0,099	90%	2,314	1,00
	210				1336,2	0,066	93%	2,719	1,18
1,83	0	9,20	0,121	5,89	0,0	1,000	0%	0,000	-
	30				176,7	0,292	71%	1,231	0,53
	90				530,2	0,227	77%	1,482	0,64
	150				883,7	0,179	82%	1,723	0,75
	210				1237,2	0,146	85%	1,924	0,84
3,82	0	9,20	0,183	4,84	0,0	1,000	0%	0,000	-
	30				145,1	0,409	59%	0,894	0,39
	90				435,2	0,318	68%	1,145	0,50
	150				725,3	0,277	72%	1,482	0,64
	210				1015,5	0,091	91%	2,398	1,04
4,82	0	9,20	0,199	4,60	0,0	1,000	0%	0,000	-
	30				138,0	0,064	94%	2,747	1,19
	90				414,1	0,026	97%	3,664	1,59
	150				690,1	0,013	99%	4,357	1,89
7,23	0	9,20	0,193	4,68	0,0	1,000	0%	0,000	-
	30				140,4	0,040	96%	3,219	1,40
	90				421,1	0,040	96%	3,219	1,40
	150				701,9	0,016	98%	4,135	1,80

Fonte: Autor.

Em todos os experimentos, é possível observar que quanto maior a dosagem aplicada, maior a eficiência de inativação obtida. Para dosagens entre 138 e 211 mJ.cm^{-2} (ou seja, os primeiros 30 segundos de inativação), as porcentagens de inativação variaram entre 54% e 96% (0,3 e 1,4 log, respectivamente), não tendo uma correlação direta entre a eficiência de inativação e a turbidez da água. De todos os experimentos realizados, o melhor resultado obtido foi para a amostra com 4,82 uT, que obteve 99,0% de inativação, não alcançando, portanto, o padrão microbiológico de potabilidade, que é a ausência de bactérias *E. coli* em 100 mL da amostra analisada. Percebe-se, diante desses dados, que houve o processo de inativação bacteriana para todas as amostras com diferentes valores de turbidez das águas, contudo ficou evidente que este é um processo complexo, visto que a turbidez apesar de ser um fator importante, não é o único determinante da eficiência do processo de inativação.

As amostras com menores valores de turbidez, 0,97 uT e 1,26 uT, apresentaram valores de absorvância baixa, 0,071 e 0,099, respectivamente, o que proporcionou intensidades médias efetivas (I_M) mais altas (7,02 e 6,36 mW.cm^{-2}). Independente disso, ficou evidente que essas amostras necessitaram da aplicação de doses de radiação ultravioleta consideravelmente elevadas, de 1264 mJ.cm^{-2} e 573 mJ.cm^{-2} , para 1,0 log de inativação da *Escherichia coli* (90% de inativação).

Ao observar estes resultados e confrontá-los com a dose mínima de 2,1 mJ.cm^{-2} para 1,0 log (90%) de inativação de cistos de *Giardia* spp. estabelecidos no Art. 30 da Portaria nº 888/2021, é notório que o valor da dose mínima da Portaria está muito distante do observado neste trabalho. Ressaltar-se ainda que a *Giardia* é um patógeno mais resistente à inativação do que a bactéria *Escherichia coli* e, na literatura, o valor da dose mínima necessária para obter 1,0 log de inativação de *Giardia* é de 63,0 mJ.cm^{-2} , enquanto que para a *Escherichia coli* é de 3,0 mJ.cm^{-2} (BARROSO, WOLF, 2009).

A amostra com turbidez igual a 1,83 uT apresentou uma intensidade média efetiva de radiação ultravioleta de 5,89 mW.cm^{-2} , para uma absorvância lida em 254 nm de 0,121. Para esse sistema, foi alcançado no máximo 0,84 log de inativação (85%), no tempo total do processo (de 210 segundos). Isso resultou em uma dose de radiação acumulada de 1237,2 mJ.cm^{-2} . Neste caso, observa-se uma redução na eficiência da inativação pelo aumento da absorção da luz na faixa germicida, dificultando o processo da fotólise do material genético dos microrganismos.

Por outro lado, as amostras com maiores valores de turbidez, 4,82 uT e 7,23 uT, alcançaram 1,19 log e 1,40 log (94% e 96% de inativação), com doses de 138 mJ.cm^{-2} e 140

mJ.cm^{-2} , respectivamente. Percebe-se que esses valores de inativação foram obtidos com menores doses de radiação ultravioleta utilizadas no sistema em batelada. Ao considerar todo o conjunto de dados obtidos, fica claro que a eficiência da inativação ultravioleta depende de outros fatores do corpo hídrico, além do material suspenso da amostra decantada, desse modo, faz-se necessário analisar mais parâmetros que podem servir como limitações no processo da desinfecção ultravioleta, como a dureza total, ferro, manganês, sólidos totais, por exemplo (MARTINS, 2021)

Ao observar as amostras por ponto de coleta tem-se o seguinte:

Tabela 13 – Análise da eficiência da desinfecção das amostras por ponto de coleta

Parâmetros	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3	
	Turbidez uT		Turbidez uT		Turbidez uT	
	1,26	1,83	0,97	3,82	4,82	7,23
Log de Inativação ⁽¹⁾	1,0	0,84	1,15	1,04	1,19	1,40
% Inativação	90%	85%	93%	90%	94%	96%
Dose de Radiação mJ.cm^{-2}	954	1237	1475	1016	138	140
Abs 254 nm	0,099	0,121	0,071	0,183	0,199	0,193
<i>E. coli</i> Inicial UFC/100mL	$3,03 \times 10^3$	$3,80 \times 10^3$	$5,6 \times 10^4$	$3,5 \times 10^4$	$9,75 \times 10^3$	$1,56 \times 10^4$

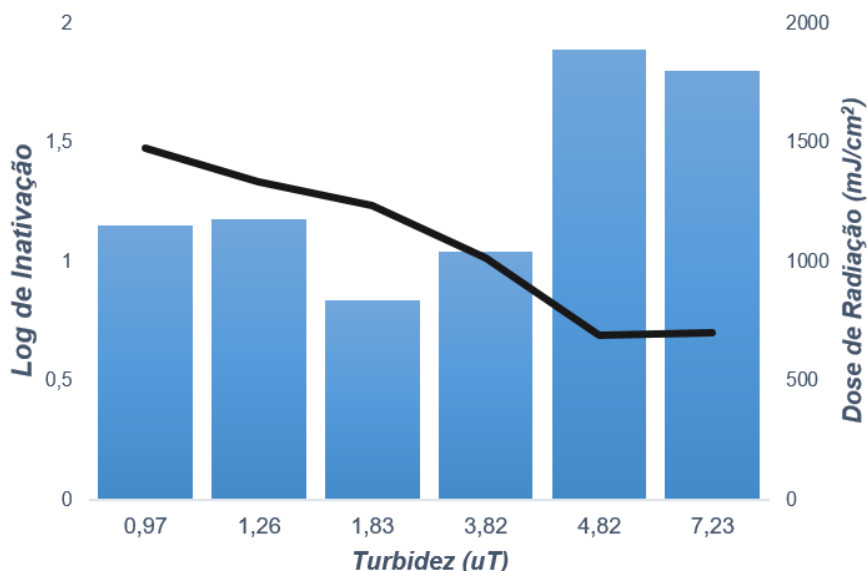
(1) Foi utilizado o primeiro valor de inativação obtido, mais próximo daquele exigido na Portaria nº 888/2021 que é de 1,0 log de inativação para a *Giardia*.

Fonte: Autor.

No ponto 1 (amostra coletada na Av. Epitácio Pessoa), fica evidente que a clarificação da água, responsável por uma redução na turbidez da água bruta de 10,17 uT para 1,26 uT e para 1,83 uT, foi uma etapa importante que influenciou na eficiência da inativação. Neste caso, a amostra com menor turbidez, alcançou 90% de inativação com uma dosagem menor (954 mJ.cm^{-2}). Resultado similar a este foi observado nos trabalhos de Martins (2021); Garay et al. (2021); Zhou et al (2017) e Adhikari et al. (2020), que enfatizaram que amostras apresentando valores maiores de turbidez oferecem mais resistência à inativação. No entanto, para as amostras coletadas no ponto 3 (no Jardim Botânico), a influência negativa da turbidez sobre o processo de inativação por radiação ultravioleta não foi percebida, uma vez que amostras com valores elevados de turbidez alcançaram praticamente a mesma inativação com dosagens mais baixas (em torno de 140 mJ.cm^{-2}).

A Figura 24 mostra o comportamento da inativação dos microrganismos patogênicos à medida do acúmulo da dose de radiação aplicada ao sistema de desinfecção.

Figura 24 – Gráfico do comportamento da inativação em função dos diferentes níveis de turbidez



Fonte: Autor.

Pode-se entender do gráfico que apesar do processo da inativação ocorrer, o sistema da desinfecção ultravioleta em batelada fez uso de doses de radiação bem elevadas, ao comparar com outros estudos da literatura. O trabalho de Pedroso, C. R. et al. (2018) obteve uma dose de radiação média de $98,68 \text{ mJ.cm}^{-2}$ para inativar a *E. coli* em mais de 2 casas logarítmicas, com a turbidez da amostra de $34,0 \text{ uT}$, aproximadamente, enquanto no presente estudo foi alcançado $1,89 \text{ log}$ de inativação para $690,1 \text{ mJ.cm}^{-2}$, para a amostra com $4,82 \text{ uT}$.

Ademais, é importante entender também que os altos valores encontrados da dose de radiação partem do valor da intensidade de radiação inicial (I_0) de $9,20 \text{ mW.cm}^{-2}$. Ao comparar com outros sistemas de desinfecção ultravioleta encontrados na literatura, percebe-se valores menores como $5,48 \text{ mW.cm}^{-2}$ (Pederoso, C. R. et al; 2018), $3,182 \text{ mW.cm}^{-2}$ para um conjunto de 3 lâmpadas (Souza, J. B; et al. 2012), $2,60 \text{ mW.cm}^{-2}$ (Tinôco, J. D.; 2011). Isso sugere que, para o presente estudo, a razão entre a potência da fonte germicida e área do sistema reacional foi alta, necessitando de otimizações para alcançar valores da dose de radiação mais inferiores, o que possibilitaria realizar uma comparação mais assertiva com os valores da literatura e da legislação.

A Tabela 14 apresenta o estudo cinético de desinfecção ultravioleta determinada no processo em batelada das maiores inativações atingidas da *E. coli*. Para definir a constante, foi necessário plotar o gráfico $\ln$ da inativação vs tempo de reação, e seguindo a equação 6, fazer a razão do coeficiente angular da reta pela intensidade média efetiva.

Tabela 14 – Estudo cinético da Inativação da *Escherichia coli*

Turbidez <i>uT</i>	Coef. Angular <i>s⁻¹</i>	K <i>cm².mJ⁻¹</i>	I_M <i>mW.cm⁻²</i>	Dose Máxima de Radiação <i>mJ.cm⁻²</i>	Log N₀/N	R²
4,82	0,0321	0,00698	4,60	690,1	1,89	0,9261
7,23	0,0297	0,00635	4,68	701,9	1,80	0,9542

Fonte: Autor.

Então, nota-se que para o processo da desinfecção ultravioleta da amostra de 4,82 uT foi obtida uma constante cinética de inativação 0,00698 cm².mJ⁻¹, enquanto para amostra de 7,23 uT a constante de inativação foi de 0,00635 cm².mJ⁻¹. Já Martino, et al. (2021), também para a *Escherichia coli*, determinou uma constante de inativação igual a 0,294 cm².mJ⁻¹ para uma dose de 21,7 mJ.cm⁻², com um coeficiente de correlação (R²) de 0,89. Observa-se uma diferença nos valores das constantes cinéticas, assim como da dose de radiação, admitindo que há uma proporcionalidade entre esses fatores. Ao analisar, nessa lógica, a equação 6 junto ao conjunto de valores alcançados nesse estudo, é evidente que a constante de inativação é inversamente proporcional à dose de radiação aplicada ao processo de desinfecção. E, ademais, percebe-se ainda que foi obtida uma constante de inativação maior para a desinfecção da amostra com a menor turbidez, o que indica, consequentemente, a necessidade de dosagens de radiação maiores para águas com valores de turbidez mais altos para obter inativações eficientes dos microrganismos indicadores de contaminação.

5.2 Desinfecção por radiação ultravioleta em Reator de fluxo Contínuo

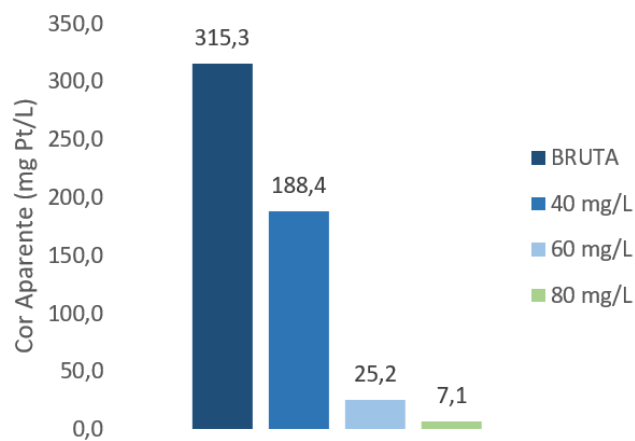
Os testes em reator de fluxo contínuo, tiveram como objetivos: aplicar dosagens menores de radiação ultravioleta na desinfecção; aplicar a desinfecção em amostras de água tratada no ponto de uso; avaliar a influência dos demais parâmetros de qualidade da água na eficiência de inativação e avaliar a eficiência de inativação em diferentes espécies (*Escherichia coli* e esporos de bactérias aeróbias).

5.2.1 Tratamento físico-químico na água bruta – Jar Test

A fim de avaliar a influência dos demais parâmetros de qualidade da água na eficiência do processo de inativação por radiação ultravioleta, realizou-se uma caracterização mais completa da qualidade da água bruta, bem como da água tratada, obtida após o processo de tratamento físico-químico. Inicialmente foram realizados experimentos de coagulação, floculação e decantação, avaliando-se três dosagens de coagulante sulfato de alumínio e determinando-se o melhor ponto para ser realizado o tratamento.

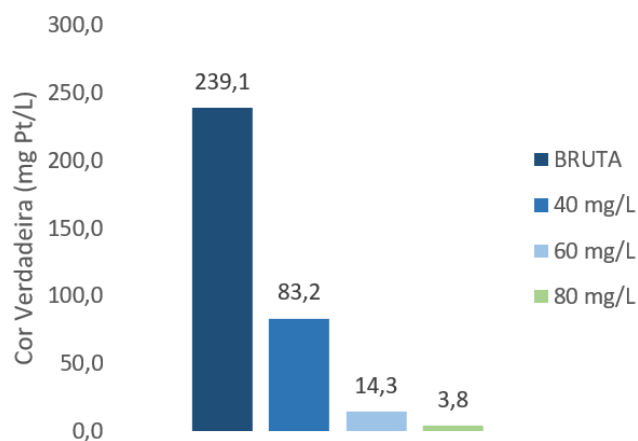
Para isso foi avaliada a remoção da cor aparente, cor verdadeira e da turbidez para as concentrações de de 40 mg.L⁻¹, 60 mg.L⁻¹ e 80 mg.L⁻¹ do coagulante em pH 6,95. Tal remoção pode ser observada nas Figuras de 25 a 27.

Figura 25 – Gráfico da remoção da Cor Aparente



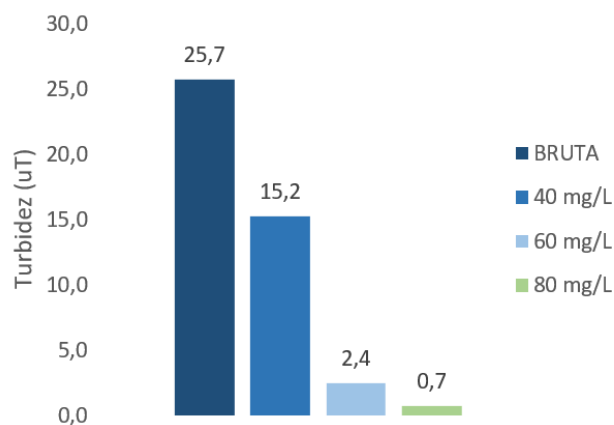
Fonte: Autor.

Figura 26 – Gráfico da remoção da Cor Verdadeira



Fonte: Autor.

Figura 27 – Gráfico da remoção da Turbidez



Fonte: Autor.

Diante dos gráficos é perceptível que o valor da concentração que obteve melhores resultados foi de 80,0 mg.L⁻¹ do sulfato de alumínio, para um pH da água bruta de 6,95. Neste ponto, a remoção da cor aparente e da cor verdadeira foram de 97,7% e 98,4%, respectivamente enquanto a remoção da turbidez foi de 97,3%. Definido o ponto ótimo para realizar-se a coagulação, floculação e decantação, essa concentração e pH, foram utilizados para o tratamento de 25 litros de amostra de água bruta, obtendo-se com isso, um volume de água suficiente para ser utilizado no sistema contínuo de desinfecção.

A Tabela 15 mostra os resultados obtidos para a caracterização completa da qualidade da água bruta e da água tratada pelo processo físico-químico convencional. Na tabela estão também os valores obtidos para os Índices de Qualidade da Água (IQA), para cada uma das amostras.

Tabela 15 - Caracterização da água bruta e água tratada

Parâmetros	Água Bruta	Água Tratada	Unidade	CONAMA nº 357
pH	6,95	6,42	-	6,0 – 9,0
Temperatura	25,9	22,5	°C	-
Turbidez	25,7	3,5	uT	100
Cor Aparente	315,3	28,9	mg Pt-Co/L	-
Cor Verdadeira	239,1	10,7	mg Pt-Co/L	75
<i>Escherichia coli</i>	5,50x10 ³	1,80x10 ³	UFC/100mL	-
Coliformes totais	6,70x10 ³	2,40x10 ³	UFC/100mL	-
Esporos de Bactérias Aeróbias	1,02x10 ³	2,40x10 ²	UFC/100mL	-
Ferro Total	1,00	<LQI	mg/L	-
Manganês	<LQI	<LQI	mg/L	-
Alumínio	<LQI	<LQI	mg/L	-
Cloreto	20,4	19,6	mg/L	-
Fósforo	0,45	<LQI	mg/L	-
Dureza Total	62,2	56,2	mg/L	-
Nitrogênio Total	0,1	<LQI	mg/L	-
Salinidade	0,107	0,110	‰	-
Oxigênio Dissolvido	3,89	3,90	mg O ₂ /L	≥ 4,0
Sólidos Dissolvidos Totais	154	156	ppm	-
Condutividade	226	233	µS/cm ²	-
Demanda Bioquímica de Oxigênio	10,0	8,50	mg O ₂ /L	10
Demanda Química de Oxigênio	20,2	20,2	mg O ₂ /L	-
Sólidos Totais	210,0	192,0	mg/L	500
Índice de Qualidade da Água (IQA)	47,22	55,13	-	-

Fonte: Autor.

A amostra de água bruta utilizada nestes experimentos foi coletada no Jardim Botânico, melhor ponto de qualidade da água em toda a Bacia Hidrográfica do rio Jaguaribe. Ao analisar de forma comparativa os resultados obtidos de qualidade da água bruta com os valores da Resolução CONAMA nº 357/2005, percebe-se que os parâmetros estão bem enquadrados, com exceção do oxigênio dissolvido. O desvio encontrado, com relação a este parâmetro, pode ser o principal fator por não possuir a presença de peixes no local da coleta da amostra, já que os peixes vivem em ambientes aquáticos com oxigênio maior ou igual a 4,0 mg O₂/L.

Ademais, percebe-se que o valor de fósforo determinado é maior que o indicado pela CONAMA nº 357, superando nove vezes mais, levantando suspeitas sobre a presença de alguns compostos superfosfatados na água do rio, decomposição de matéria orgânica, resíduos de animais criados a margem do rio e a contaminação por esgoto doméstico, sem um tratamento adequado, com altos teores de detergente e produtos de limpeza, o que pode ocasionar formação de espumas na superfície do rio e, conseqüentemente, diminuir ainda mais o oxigênio dissolvido da água.

A água decantada apresentou uma melhora em muitos parâmetros, em especial para cor aparente e verdadeira com remoções de 90,8% e 95,5%, respectivamente. Para a turbidez observou-se uma remoção de 86,4%. Parâmetros como sólidos totais, oxigênio dissolvido, DBO também apresentaram melhores valores após o tratamento físico-químico. Foi observado também que não houve alumínio residual na amostra tratada após a coagulação, evidenciando que o processo ocorreu de forma correta.

Assim como o estudo de Libânio (2010), foi possível determinar uma redução significativa da concentração dos microrganismos após o processo de coagulação. Houve uma remoção da E. coli de 0,49 log (67,3%), enquanto a remoção dos EBAs alcançou 0,62 log (76,5%). Como os esporos possuem dimensões maiores que as bactérias, é esperado que um tratamento físico-químico, como a coagulação, seja eficiente, assim como na pesquisa de Oliveira, Basto, da Silva (2018), que obteve uma remoção de 0,65 log deste mesmo patógeno após a decantação.

Com esses resultados, nota-se que a água tratada possui uma condição melhor que a amostra de água bruta ao também comparar os valores calculados para o IQA das amostras. A água bruta está na categoria “**Razoável**” do IQA, enquanto a água tratada está na faixa “**Boa**”. Tal classificação indica que a água bruta do rio Jaguaribe possui interferência antrópica, evidenciada pela presença alta de fósforo, mas também para a alta contagem dos coliformes

termotolerantes, superando o número de 2500 UFC/100mL, citado na CONAMA nº 357, restringindo a recreação de contato secundário no trecho da coleta.

5.2.2 Aplicação da desinfecção por radiação ultravioleta em reator de fluxo contínuo

5.2.2.1 Análise da eficiência de inativação para diferentes espécies

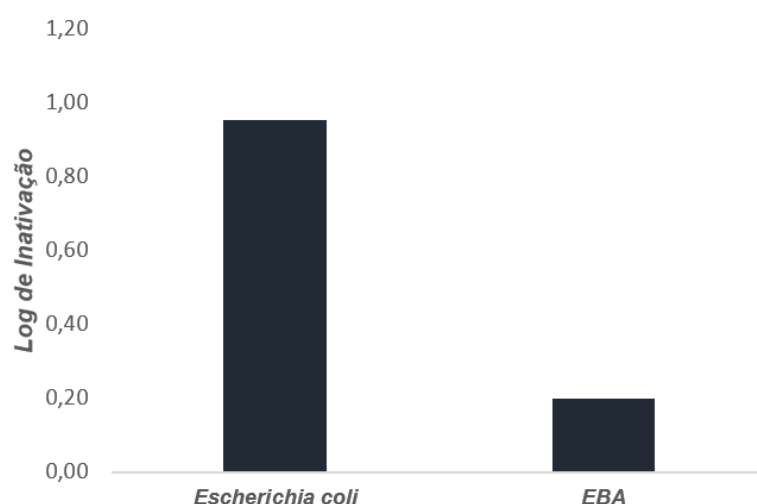
Cálculo da dose aplicada no reator de fluxo contínuo

A lâmpada utilizada no reator de fluxo contínuo construído neste trabalho, tem uma potência de $14,0 \times 10^3$ mW na faixa da luz que apresenta propriedades germicidas (254 nm). A área do reator é igual a $1166,1 \text{ cm}^2$ e portanto, a intensidade inicial da radiação proposta é $12,0 \text{ mW.cm}^{-2}$. A absorvância em 254 nm medido para essa amostra da água decantada foi de 0,079 e, sabendo que a lâmina de líquido do reator é de 0,85 cm, a intensidade média efetiva (I_M) é de $11,6 \text{ mW.cm}^{-2}$.

O volume útil do reator é de 761,4 mL e para desinfetar 5 litros de água, foi gasto um tempo total de 122 segundos, resultando em uma vazão de $41,0 \text{ mL.s}^{-1}$. Neste sistema, o tempo de residência médio foi de 18,6 segundos, resultando em uma dosagem de $215,8 \text{ mJ.cm}^{-2}$.

A Figura 28 mostra a eficiência de inativação obtida aplicando a dose de radiação de $215,8 \text{ mJ.cm}^{-2}$ para as bactérias *Escherichia coli* e para os Esporos de Bactérias Aeróbias.

Figura 28 – Perfil de Inativação dos microrganismos para a dose de $215,8 \text{ mJ.cm}^{-2}$



Fonte: Autor.

A eficiência de inativação alcançada para as bactérias *Escherichia coli* foi de 0,95 log (88%), enquanto a inativação dos esporos de bactérias aeróbias foi de 0,20 log (37,5%). Com base nesses resultados, pode-se observar que os EBAs possuem uma maior resistência à desinfecção que as bactérias *Escherichia coli*, comportamento de inativação de acordo com

trabalho de Pedroso, C.R. et al (2018). Pode-se notar também que os esporos de bactérias aeróbias apresentaram uma remoção no processo físico-químico de 0,68 log, superior à inativação de 0,20 log no processo da desinfecção por radiação ultravioleta. Esse resultado evidencia que a etapa de coagulação, floculação, decantação e, conseqüentemente, a filtração é fundamental para a remoção desses microrganismos patogênicos da água a ser destinada ao abastecimento público captada de um manancial superficial.

Contudo, ao confrontar esses resultados obtidos com a dose mínima de $2,1 \text{ mJ.cm}^{-2}$ para 1,0 log (90%) de inativação de cisto de *Giardia* spp. estabelecida no Art. 30 da Portaria nº 888/2021, é notório que o valor da dose mínima da Portaria está consideravelmente baixo, já que não foi obtida uma inativação maior que 1,0 log para a bactéria *E. coli*, sob uma dose de $215,8 \text{ mJ.cm}^{-2}$. Atrelado a isso, na literatura também são encontrados valores das doses de radiação bem acima dos propostos pela legislação. O estudo de Souza, J. B. et. al (2012) para a inativação de 3 casas logarítmicas foi necessária de uma dose de $95,13 \text{ mJ.cm}^{-2}$, para uma concentração de *E. coli* de $8,0 \times 10^5 \text{ UFC/100mL}$ e turbidez igual a 23,5 uT. Enquanto, ainda para essa pesquisa, para uma turbidez de 41,8 uT e uma concentração de inicial de *E. coli* de $7,90 \times 10^4 \text{ UFC/100mL}$, também não foi atingido 1,0 log de inativação para uma dose de $190,26 \text{ mJ.cm}^{-2}$.

Desse modo, é evidente que tanto para o sistema em fluxo contínuo projetado e construído neste trabalho, como para algumas pesquisas existentes, a Portaria nº888/2021 propõe um valor de dose de radiação que não certifica o compromisso da exigência do padrão de potabilidade bacteriológico (Anexo 1) da ausência de *Escherichia coli* em 100mL de amostra de água potável.

A Figura 29 mostra a avaliação da inativação da *E. coli* pela análise de ausência e presença, realizada pelo método cromogênio ONPG e o indicador fluorogênico. Por este método, caso a amostra brilhe, frente à irradiação de luz ultravioleta em 365 nm, indica-se a presença da bactéria *E. coli*. Como pode ser observado na figura, a amostra na entrada do reator possui presença de *E. coli*, e após a desinfecção, diferentemente do resultado obtido pela análise de contagem pelo método do meio cromogênico de filtração em membranas, não foi detectada a presença da bactéria.

Figura 29 – Teste de ausência/presença de *E. coli*

Fonte: Autor.

5.2.2.2 Análise da eficiência de inativação para amostra com menores valores de dosagem e turbidez

Nesta etapa do trabalho, objetivou-se alcançar um valor menor de turbidez na água que será destinada ao processo de desinfecção, aproximando-se o máximo possível do valor definido no Anexo 2 da Portaria nº888/2021 para água filtrada (0,5 uT). Neste caso, foi realizada uma filtração simples da amostra decantada cujas características estão descritas na Tabela 14.

A Tabela 16 apresenta a caracterização obtida para a água filtrada.

Tabela 16 - Caracterização da Água filtrada

Parâmetros	Valor	Unidade
Turbidez	0,69	uT
pH	6,77	-
Abs 254	0,089	cm ⁻¹
Cor Aparente	3,48	mg Pt-Co/L
Temperatura	24,0	°C
<i>Escherichia coli</i>	1,40x10 ³	UFC/100mL
Coliformes totais	2,40x10 ³	UFC/100mL

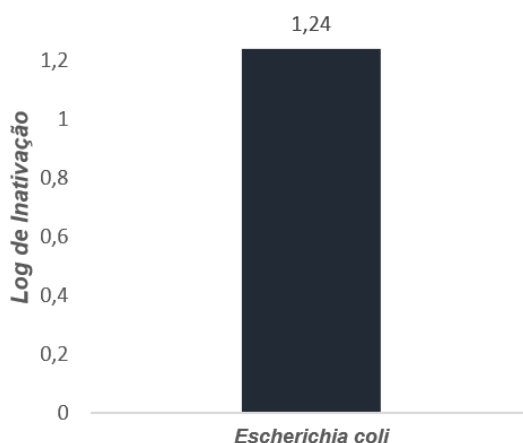
Fonte: Autor.

Ao compara essa amostra com a água bruta, houve um decaimento tanto da cor aparente quanto da turbidez, alcançando uma remoção de 98,9% e 97,3%, respectivamente. Junto a isso, após a filtração da água decantada, a concentração de *Escherichia coli* reduziu de 1,80x10³ UFC/100mL para 1,40x10³ UFC/100mL, contudo a de coliformes totais foi a mesma. Para esse teste de desinfecção, não foi possível fazer a contagem de EBAs.

Cálculo da dose aplicada no reator de fluxo contínuo para a amostra da água filtrada

Com o valor da absorbância em 254 nm medida e apresentada na Tabela 15, além das considerações do sistema do reator contínuo, o valor da intensidade média de radiação efetiva é de $11,56 \text{ mW.cm}^{-2}$. Para desinfetar 5 litros de água, foi gasto um tempo total de 73 segundos, resultando em uma vazão de $68,5 \text{ mL.s}^{-1}$. Neste sistema, o tempo de residência médio foi de 11,11 segundos. Portanto, o valor da dose de radiação foi de $128,4 \text{ mJ.cm}^{-2}$. A Figura 30 mostra o perfil de desinfecção obtido sob essa dose de radiação.

Figura 30 - Perfil de Inativação da *Escherichia coli* para a dose de $128,4 \text{ mJ.cm}^{-2}$



Fonte: Autor.

Para a contagem dos microrganismos da amostra desinfetada foi utilizado o método de balneabilidade, que possui um limite de quantificação inferior de 80 UFC/100mL. Após a desinfecção, não houve crescimento para a bactéria *E. coli* no meio de cultura, indicando a inativação completa, ou uma contagem abaixo de 80 UFC/100mL. Para efeito de comparação, considerando que houve, no máximo, uma contagem de *E. coli* igual ao limite inferior, o processo de inativação atingiu 1,27 log, para uma remoção de 94,3%. A Tabela 17 mostra, de forma comparativa, os resultados obtidos da inativação da *Escherichia coli* pela desinfecção por radiação ultravioleta com a amostra de água decantada (3,5 uT) e com a amostra da água filtrada (0,69 uT).

Tabela 17 – Resultados obtidos da desinfecção ultravioleta em fluxo contínuo

Turbidez <i>uT</i>	Dose de Radiação <i>mJ.cm⁻²</i>	Log N ₀ /N	% de Inativação	Abs 254	<i>E. coli</i> Inicial
3,50	215,8	0,95	88,0	0,079	$1,80 \times 10^3$
0,69	128,4	1,24	94,3	0,089	$1,40 \times 10^3$

Fonte: Autor.

Com esses valores, percebe-se que mesmo para uma dose de radiação menor na desinfecção da água filtrada, ao comparar com a desinfecção da água decantada, houve um processo mais eficiente na remoção dos patógenos, sugerindo que o processo com a turbidez menor, no fluxo contínuo de radiação, facilite a desinfecção por radiação ultravioleta. Essa lógica também foi encontrada no estudo de Garay et al. (2021), que amostras com 5,0 uT alcançaram inativação dos microrganismos bem superior às amostras com 300 uT, e com o aumento das doses de radiação, a diferença era mais significativa. Com isso, ressalta-se, com esses resultados e com a validação dos estudos da literatura, que o processo da clarificação da amostra auxilia o processo da desinfecção ultravioleta.

Nota-se, ademais, para atingir o valor de 1,27 log de inativação (94,3%) da bactéria *Escherichia coli* no processo da desinfecção ultravioleta contínua foi, novamente, necessária uma dose superior ao estabelecido pelo Art. 30 da Portaria GM/MS, sugerindo, com bases nesses resultados e na literatura, a revisão do valor mínimo da dose de radiação proposto pela legislação para alcançar a produção da água potável que atenda ao Anexo 1 (padrão bacteriológico) da própria Portaria nº888/2021.

A Figura 31 mostra o processo de inativação da *E. coli* pelo teste de ausência e presença (Colilert). Como pode ser observada, a amostra da água filtrada (entrada do reator) possui presença de *E. coli*, e não foi detectada a presença da bactéria nesse teste após a desinfecção, neste teste.

Figura 31 - Teste de ausência/presença de *E. coli*



Fonte: Autor.

5.2.2.3 Análise da eficiência de inativação no ponto de uso

Nesta etapa do trabalho, objetivou-se avaliar a desinfecção por radiação ultravioleta em amostras de água tratadas, ou seja, já no ponto de consumo. Para realizar o teste da desinfecção, foi coletada uma amostra na cozinha da residência universitária da UFPB. A Tabela 18 mostra a caracterização básica da amostra.

Tabela 18 - Caracterização da água do ponto de uso

Parâmetros	Valor	Unidade
Turbidez	<LQI	uT
pH	7,74	-
Abs 254	0,006	-
Cor Aparente	<LQI	mg Pt-Co/L
Temperatura	25,9	°C
Cloro Total	0,029	mg/L
<i>Escherichia coli</i>	0	UFC/100mL
Coliformes totais	$4,0 \times 10^2$	UFC/100mL

Fonte: Autor.

A amostra possui cor aparente e turbidez abaixo dos limites de quantificação do método seguido, e por se tratar de uma água em ponto de uso, a concentração de cloro encontra-se inferior ao exigida pela Portaria nº888/2021, de 0,2 mg.L⁻¹ (Art. 32). Não foi determinada a presença de *E. coli*, contudo essa amostra de água ainda não poderia ser destinada ao consumo humano por apresentar uma concentração de coliformes totais superior ao estabelecido no Anexo 1 da Portaria, de ausência em 100 mL, evidenciando a necessidade da desinfecção.

Cálculo da dose aplicada no reator de fluxo contínuo para a amostra no ponto de uso

Com o valor da absorbância em 254 nm medida igual a 0,006, além das considerações do reator contínuo, o valor da intensidade média de radiação efetiva é de 11,96 mW.cm⁻². Para tratar 2 litros de água, foi gasto um tempo total de 19,23 segundos, resultando em uma vazão de 104,0 mL/s. Assim, nesse sistema, o tempo de residência médio foi de 7,32 segundos. Desse modo, o valor da dose de radiação para esse ensaio de desinfecção foi de 87,5 mJ.cm⁻².

Após a desinfecção, não houve contagem de coliformes totais pelo método da balneabilidade, indicando uma inativação completa (100%) dos microrganismos. Este resultado mostra que o padrão microbiológico do Anexo 1 da Portaria GM/MS nº888/2021 foi atendido, contudo foi necessária uma dose de radiação superior ao valor da dose de mínima sugerida pela Portaria. Fica evidente novamente, sob esses resultados, a necessidade de valores de dose de radiação maiores que o valor mínimo estabelecido pela legislação vigente para realizar o fornecimento de água potável, ao propor o uso da desinfecção por radiação ultravioleta.

A Figura 32 mostra o processo de inativação da *E. coli* pelo teste de ausência e presença (Colilert).

Figura 32 - Teste de ausência/presença de *E. coli*



Fonte: Autor

Esse resultado, portanto, admite que a desinfecção por radiação ultravioleta em fluxo contínuo proporcionou uma inativação completa (100%) dos microrganismos indicadores, dessa forma atendendo o padrão microbiológico (Anexo 1) da Portaria GM/MS nº 888/2021, de ausência de coliformes totais e *Escherichia coli* em 100 mL da amostra após a passagem única no reator.

5.2.3 Custo da montagem do reator em fluxo contínuo

É apresentado na Tabela 19 o custo total aproximado para a montagem do reator para a desinfecção por radiação ultravioleta em fluxo contínuo.

Tabela 19 – Custo da montagem do reator

Peça/Material	Valor unitário (R\$)	Quantidade
Lâmpada	246,56	1
Tubo de Quartzo	500,00	1
Tubo 40 mm (1 m)	5,81	1
Tubo 32 mm (1 m)	3,82	1
Mangueira ½" x 2 (1m)	7,50	1
Acessórios ⁽¹⁾	30,00	-
Anel de vedação	2,50	3
Bomba 900 L.h ⁻¹	140,00	1
Abraçadeira Nylon	18,90	2
Instalação Elétrica	15,70	-
Spray tinta azul	24,60	1
Total		R\$ 1019,29

(1) Compreende os adaptadores, terminais cabeça, Tê, bucha.

Fonte: Autor.

6 CONCLUSÃO

O estudo da desinfecção ultravioleta possibilitou determinar a inativação dos microrganismos a partir da montagem de um reator em batelada e da construção e otimização do reator contínuo, promovendo a desinfecção de amostras de água do rio Jaguaribe, como também a inativação completa das bactérias presentes na água do ponto de uso da UFPB.

Para a desinfecção ultravioleta em reator batelada ficou evidente que a turbidez não é o único parâmetro determinante na eficiência do processo, apesar de ser um importante fator da caracterização da amostra, sendo necessário, para este caso, avaliar outros parâmetros no sistema. Foi alcançada 1,19 log (94%) de inativação da *E. coli*, para a amostra com 4,82 uT, aplicada uma dose de 138 mJ.cm⁻²; bem como 1,40 log (96%) de inativação para uma amostra com 7,23 uT, submetida a uma dose de radiação de 140 mJ.cm⁻².

Já na desinfecção por radiação ultravioleta em fluxo contínuo, foi possível observar que a turbidez foi um fator limitante, desfavorecendo a desinfecção em valores mais elevados. A desinfecção da *E. coli* para a amostra com 3,5 uT alcançou 0,95 log (88%) de inativação, para uma dose de 215,8 mJ.cm⁻², enquanto a inativação dessa bactéria na amostra filtrada de 0,69 uT alcançou 1,24 log (94,3%), para uma dose de radiação igual a 128,4 mJ.cm⁻². Além disso, foi possível determinar que os esporos de bactérias aeróbias possuem uma maior resistência à inativação ao ser comparadas com a *E. coli*, no entanto são mais suscetíveis à remoção por processo físico-químico.

Com os resultados deste estudo para o processo da desinfecção ultravioleta em batelada e fluxo contínuo, é sugerida uma dose de radiação entre 80 mJ.cm⁻² e 140 mJ.cm⁻² para alcançar o valor de 1,0 log (90%) de inativação das bactérias *Escherichia coli*, em amostras que atendem o padrão de turbidez da Portaria nº888/2021 (Anexo 2). Contudo para microrganismos mais resistentes, como os EBAs, é indicado doses de radiação maiores.

Nota-se, portanto, que os valores de inativações nesse estudo, assim como na literatura, necessitaram de doses de radiação bem maiores que o valor mínimo de 2,1 mJ.cm⁻², indicado no Art. 30 da Portaria GM/MS nº 888/2021, sugerindo que a legislação brasileira possui um modelo que não certifica boas inativações ao projetar métodos e sistemas com o valor proposto, sendo necessária a revisão da dose mínima de radiação indicada para a inativação dos microrganismos pela desinfecção ultravioleta, possibilitando assim uma produção de água segura destinada ao abastecimento público do Brasil.

6.1 Perspectivas para trabalhos futuros

1. Projetar um ensaio de desinfecção com o valor da dose de radiação indicado pela Portaria GM/MS nº888/2021 e avaliar a inativação dos microrganismos;
2. Acoplar um sistema de filtração ao reator contínuo, para avaliar a remoção da turbidez e como pode influenciar o processo da desinfecção;
3. Realizar um ensaio de desinfecção por radiação ultravioleta, em operação contínua, com tempos de residências similares e utilizar lâmpadas com diferentes potências. Avaliar a inativação dos microrganismos para a variação das doses de radiação para mesmas amostras de água.
4. Avaliar se há um processo de fotorreativação dos microrganismos, e determinar sua significância.

7 REFERÊNCIAS

ADHIKARI, A. et Al. **Evaluation of ultraviolet (UV-C) light treatment for microbial inactivation in agricultural waters with different levels of turbidity.** Food Science & Nutrition, v.8, n.2, p.1237–1243, 2020.

ANA. Portal de Qualidade das Águas. **Indicadores de Qualidade – Índice de Qualidade da Água (IQA).** Disponível em: <https://www.ana.gov.br/portalspnqa/indicadores-indice-aguas.aspx> Acesso em: 25 de março de 2025.

Artichowicz, W.; Luczkiewicz, A.; Sawicki, J. M. **Analysis of the Radiation Dose in UV Disinfection Flow Reactors.** Journal Water, Gdansk, v12, 231, 2020.

ASSIRATI, D. M. **Desinfecção de efluentes de ETE com ozônio para uso agrícola.** Dissertação de mestrado. Campinas, P-152, 2005.

BAILEY, E. S. et al. **Methods, Protocols, Guidance and Standards for Performance Evaluation for Point-of-Use Water Treatment Technologies: History, Current Status, Future Needs and Directions.** Water, Vol. 13, No 8, 2021.

BAIRD, C. **Environmental Chemistry**, W.H. Freeman and Company Ed., 2 ed., NY, 2001.

BARROSO, L. B.; WOLF, D. B. **RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA PARA DESINFECÇÃO DE ÁGUA.** Ciências Naturais e Tecnológicas, S. Maria, v10, n1, p. 1-13, 2009.

BASTOS, A. R.; AFONSO, J. C. **SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO: CENTRÍFUGAS E PAPÉIS DE FILTRO.** Quim. Nova, Vol. 38, No. 5, 749-756, 2015.

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

BURGARDT, T. **Técnicas de filtração de água destinadas ao abastecimento público – estudo de caso lagoa do Peri.** 2015, 47

CAIUSCA, A. **Escherichia Coli.** Educa+Brasil, 2019. <<https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/biologia/escherichia-coli>> Acesso em 16/03/2025.

CETESB-SP. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo – 2018/Apêndice D–Índice de Qualidade das Águas.** 2018. Disponível em: www.cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2017/11/Ap%C3%AAndice-D-%C3%8Dndices-de-Qualidade-das-%C3%81guas.pdf. Acesso em: 24/03/2025. 74

CETESB-SP. **Qualidade das Águas Doces no Estado de São Paulo - Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem/ Apêndice E – 2016.**

De Melo, A. R. F. F. **Análise epidemiológica de óbitos por diarreia e gastroenterite de origem infecciosa presumível em crianças menores de 10 anos no Brasil e suas macrorregiões.** Brazilian Journal of Implantology and Health Sciences, v.5, Pág 608-617, 2023.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** v. 2. São Carlos: Rima, 2005.

DE FARIAS, B. A. **Diagnóstico da Qualidade da Água do rio Jaguaribe ao longo da última década.** Trabalho de Conclusão de Curso. João Pessoa, 77p, 2015.

FEITOSA, Ailton; et al. **O comprometimento das águas do riacho Piauí em Arapiraca/AL: causas e consequências.** Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 6, n. 1, p.2227-2242jan. 2020.

FUNASA. **Manual Prático de Análise de Água.** Fundação Nacional da Saúde, 2013.

Garay et al. **Effect of turbidity on ultraviolet disinfection of domestic wastewater for agricultural reuse.** Rev. Ambiente & Água, v.16, n6, Taubaté, 2021.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água.** Ed. 3, Campinas: Editora Átomo, 2010.

LOBO, M. G. **Avaliação da desinfecção de água por reator utilizando radiação ultravioleta.** Dissertação de mestrado - Universidade da Região de Joinville, Joinville, p.85, 2008.

LOGAN, N.A. **Bacillus and relatives in foodborne illness.** Journal of Applied Microbiology, v.112, n. 3, p. 417-429, 2012.

MARTINO, et al. **Virus and Bacteria Inactivation Using Ultraviolet Light-Emitting Diodes**. Environmental Engineering Science, v. 38, n. 6, p. 458-468, 2021.

MARTINS, R. J. E. **Radiação Ultravioleta na desinfecção de águas residuais domésticas**. Ed. 1, Iguatu: Quipá Editora, 2021.

MICROAMBIENTAL. **Análise de bactérias coliformes na água: por que fazer?** 2021. <<https://microambiental.com.br/analises-de-agua/analise-de-bacterias-coliformes-na-agua-por-que-fazer/>>. Acesso em 16/03/2025.

OLIVEIRA, K. C.; BASTOS, R. K. X; DA SILVA, C. V. Esporos de bactérias aeróbias são bons indicadores da eficiência do tratamento de água? Um estudo exploratório. Revista Eng Sanit Ambiental, v.23, 1103-1109, 2018.

PEDROSO, et al. **Inativação de microrganismos indicadores de contaminação fecal por radiação ultravioleta e avaliação dos fenômenos de fotorreativação e recuperação no escuro**. Revista Eng Sanit Ambient, Paraná, v23, n5, p987-994, 2018.

PNSH. Plano Nacional de Segurança Hídrica, Brasil, 2020.

SOUZA, J. B. et al. **Avaliação do emprego da radiação ultravioleta na desinfecção de esgoto sanitário**. Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina. v.33, n.2, p. 117-126, 2012.

SILVA, A. B. da. **Desinfecção de água contaminada com Escherichia Coli: desenvolvimento de fotorreator e estudo cinético**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco. 2007.

Surtos de doenças de veiculação hídrica. <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/atendimento-a-emergencia/surtos-de-doencas-de-veiculacao-hidrica/> Acesso em 16/03/2025.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F.L.; STENSEL, H.D. Wastewater engineering, treatment and reuse. 4th ed./revised. Nova Iorque: Metcalf & Eddy Inc. McGraw-Hill. 2003. p. 1819.

TINÔCO, J. D. **Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica**. 2011. 222. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

TOMAZ, P. A.; SANTOS, J. de O.; JEPSON, W. **Insegurança Hídrica Domiciliar e Vulnerabilidade Social em Contexto Municipal do Semiárido Cearense**. Sociedade e Natureza, v.35, pag1-12, Uberlândia, 2023.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Alternative Disinfectants and oxidants guidance manual. 1999.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). (2011) Guidelines for drinking water quality. 4. ed. Geneva: WHO, 2011.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). drinking water, 2023. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water> Acesso em: 29 de março de 2025.

ZHOU, et al. **Kinetics of inactivation and photoreactivation of Escherichia coli using ultrasound-enhanced UV-C light-emitting diodes disinfection**. Ultrasonics Sonochemistry, v35, p.471–477, 2017.