



CENTRO UNIVERSITÁRIO CHRISTUS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

INDEMBERG ARAUJO ALVES

RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA APLICADA À DESINFECÇÃO DE ÁGUAS
SUPERFICIAIS URBANAS

FORTALEZA

2021

INDEMBERG ARAÚJO ALVES

RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA APLICADA À DESINFECÇÃO DE ÁGUAS
SUPERFICIAIS URBANAS

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

Orientador: Prof. Dr. Eliezer Fares Abdala Neto

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Centro Universitário Christus - Unichristus

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

A658r Alves, Indemberg Araújo.
 RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA APLICADA À
 DESINFECÇÃO DE ÁGUAS SUPERFICIAIS
 URBANAS / Indemberg Araújo Alves. -2021.
 67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Centro Universitário Christus - Unichristus, Curso de
Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Eliezer Fares Abdala Neto.

1. água . 2. desinfecção. 3. Radiação. 4. UV-C. I. Título.

CDD 624

INDEMBERG ARAÚJO ALVES

RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA APLICADA À DESINFECÇÃO DE ÁGUAS
SUPERFICIAIS URBANAS

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

Orientador: Prof. Dr. Eliezer Fares Abdala Neto

Aprovado em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. André Gadelha de Oliveira
Universidade de Fortaleza (UNIFOR)

Aos meus pais por me concederem a vida, aos professores, principalmente ao meu orientador, por repassar seu conhecimento e contribuir para minha formação acadêmica e profissional.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por manter-me vivo e possibilitar o alcance desta nova conquista.

A minha família, pela compreensão de não poder comparecer em alguns momentos e pelo apoio prestado durante a elaboração deste trabalho.

A Alessandra, por dividir a minha atenção com esta pesquisa e compreender a importância desse momento de total dedicação à esta pesquisa.

A todos meus professores que contribuíram com seus conhecimentos e ensinamentos para minha formação ao longo dessa graduação.

Ao meu orientador Dr. Eliezer Fares Abdala Neto por sua disponibilidade, dedicação, ensinamentos e sua proficiência em transmitir o conhecimento técnico e científico para a elaboração deste trabalho.

Ao Centro Universitário Christus e a todos que fazem parte desta instituição pela oportunidade de realizar esta pesquisa e disponibilizar o espaço físico para realização dos experimentos.

RESUMO

A busca por novas tecnologias que sejam capazes de realizar a desinfecção de águas em alternativa ao uso de desinfetantes a base de cloro, tem como objetivo evitar a formação de subprodutos nocivos à saúde humana. Exemplos desses subprodutos são os trihalometanos (THM) e os ácidos haloacéticos (AHA), resultantes da reação da matéria orgânica natural (MON) com o cloro. Este trabalho consiste em analisar desde a concepção à operação de um fotorreator ultravioleta (UV-C) aplicado na desinfecção de água da lagoa da Messejana-CE, adequando-a aos parâmetros de potabilidade físico-químicos e microbiológicos. Com uma amostra de 50L de água, realizou-se dois experimentos em laboratório, um com vazão de 0,4 L/min e o outro com vazão de 0,8 L/min, durante os experimentos, coletou-se alíquotas a cada 3 min de funcionamento e finalizando cada experimento após 18 minutos. Posteriormente, foram analisadas com equipamentos de bancadas, os parâmetros de Turbidez, pH e TDS. Ao obter o melhor resultado para o parâmetro turbidez, replicou-se estas condições operacionais, tais como: vazão de 0,4 L/min, tempo de experimentação 3 min, tempo de detenção hidráulica de 1 min e 43 s e dose de irradiação de 23,92 mWs/cm². As amostras coletadas de água bruta e tratada, foram enviadas a um laboratório de análises e exames externo para melhor aferição da eficiência alcançada. O parâmetro de Cor Aparente, obteve resultado igual ao de água bruta, de 100 uH, ou seja, a aplicação da radiação UV-C não mostrou efeitos significativos para o que causa cor na água, como já era esperado, pois a radiação UV-C age na inativação dos microrganismos. A Turbidez da água tratada, resultou em 5,8 UNT, obteve-se redução de 36%, porém ainda manteve-se cerca de 16% acima do estabelecido pela Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil. Os resultados obtidos para os exames microbiológicos, demonstram a alta capacidade que o tratamento proposto tem de inativar os microrganismos existentes na água contaminada com bactérias heterotróficas, *Escherichia coli* e Coliformes Totais, atendendo aos padrões estabelecidos pela Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil. Os custos relativos a concepção do fotorreator resultou em um valor de R\$ 844,00, já o custo de operação, considerando a desinfecção de 1000 L de água, com consumo de energia de 18,66 kWh/m³, aplicando-se o valor monetário do Kwh praticado na cidade de Fortaleza, de R\$ 0,85, resulta em um valor total de R\$ 15,86/m³, deste modo, percebe-se que é uma tecnologia de baixo custo de investimento e operação, sendo viável e acessível no aspecto de uso doméstico.

Palavras-chave: Água. Desinfecção. Radiação. UV-C.

ABSTRACT

The search for new technologies that are capable of disinfecting water as an alternative to the use of chlorine-based disinfectants aims to avoid the formation of byproducts that are harmful to human health. Examples of these by-products are trihalomethanes (THM) and haloacetic acids (HAA), resulting from the reaction of natural organic matter (NOM) with chlorine. This work consists of analyzing from the conception to the operation of an ultraviolet photoreactor (UV-C) applied in the disinfection of water from the Messejana-CE lagoon, adapting it to the physicochemical and microbiological potability parameters. With a 50L water sample, two laboratory experiments were performed, one with a flow rate of 0.4 L/min and the other with a flow rate of 0.8 L/min. During the experiments, aliquots were collected every 3 min of operation and each experiment was terminated after 18 minutes. Subsequently, the Turbidity, pH and TDS parameters were analyzed with bench equipment. When the best result was obtained for the turbidity parameter, these operational conditions were replicated, such as: flow rate of 0.4 L/min, experiment time of 3 min, hydraulic detention time of 1 min and 43 s and irradiation dose of 23.92 mWs/cm². The samples collected from raw and treated water were sent to an external analysis and examination laboratory for a better evaluation of the efficiency achieved. The Apparent Color parameter obtained the same result as the raw water, 100 uH, that is, the application of UV-C radiation did not show significant effects on the color of the water, as expected, since UV-C radiation acts in the inactivation of microorganisms. The turbidity of the treated water resulted in 5.8 UNT, a reduction of 36% was obtained, but it was still about 16% above the level established by the Ordinance No. 888 of the Ministry of Health of Brazil. The results obtained for the microbiological tests show the high capacity that the proposed treatment has to inactivate microorganisms in the water contaminated with heterotrophic bacteria, *Escherichia coli* and total coliforms, meeting the standards established by the Ordinance No. 888 of the Ministry of Health of Brazil. The costs for the design of the photoreactor resulted in a value of R\$ 844.00, while the cost of operation, considering the disinfection of 1000 L of water, with energy consumption of 18.66 kWh/m³, applying the monetary value of kWh practiced in the city of Fortaleza, of R\$ 0.85, results in a total value of R\$ 15.86/m³, thus, it is clear that it is a technology of low investment and operation cost, being viable and affordable in the aspect of domestic use.

Key words: Water. Disinfection. Radiation. UV-C.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de tratamento de águas para consumo humano.....	18
Figura 2 - Ilustração do processo de coagulação.....	19
Figura 3 - Ilustração do processo de coagulação.....	20
Figura 4 - Ilustração do processo de floculação	21
Figura 5 - Funcionamento do processo de decantação.....	21
Figura 6 - Filtração direta ascendente.....	22
Figura 7 - Filtração descendente.....	23
Figura 8 - Filtro rápido	23
Figura 9 - Espectro da luz ultravioleta.....	28
Figura 10 - Ilustração de uma lâmpada UV-C.....	30
Figura 11 - Funcionamento da lâmpada UV-C	31
Figura 12 - Processo de ação da luz UV-C.....	33
Figura 13 - Resultado da ação UV-C nos filamentos de DNA.....	35
Figura 14 - Ilustração de um reator com lâmpada imersa	36
Figura 15 - Ilustração de um reator com lâmpada emersa.....	36
Figura 16 - Localização geográfica da Lagoa de Messejana (Fortaleza/CE).....	37
Figura 17 - Lâmpada UV-C.....	38
Figura 18 - Esboço da setup utilizada nos experimentos.....	38
Figura 19 - Coleta da amostra de água	39
Figura 20 - Frascos com água bruta para análise.....	40
Figura 21 - Tubos de Falcon identificados de acordo com o tempo de coleta	41
Figura 22 - Frascos com a amostra de água tratada para análise.....	41
Figura 23 - Fotorreator montado para os experimentos da referida pesquisa.	44
Figura 24 - Constatação de Lâmpada UV-C ligada, durante os experimentos.....	45
Figura 25 - Valores obtidos no experimento de bancada para o pH e a Turbidez na vazão de 0,4 L/min	50
Figura 26 - Valores obtidos no experimento de bancada para o pH e a Turbidez na vazão de 0,8 L/min	52
Figura 27 - Comparativo de pH e Turbidez para vazões de 0,4 L/min e 0,8 L/min.....	53
Figura 28 - Comparativo dos resultados de TDS para vazões de 0,4 L/min e 0,8 L/min.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição de energia de uma lâmpada UV-C.....	29
Tabela 2 - Características das lâmpadas UV-C	32
Tabela 3 - Resultados físico-químicos para água bruta.....	46
Tabela 4 - Resultados dos exames microbiológicos realizados nas amostras da água bruta....	47
Tabela 5 - Resultados de bancada para experimento de vazão 0,4 L/min.....	49
Tabela 6 - Melhores resultados para experimento com vazão de 0,4 L/min.....	50
Tabela 7 - Resultados de bancada para experimento de vazão 0,8L/min.....	51
Tabela 8 - Melhores resultados obtidos entre os experimentos realizados.	52
Tabela 9 - Resultados físico-químicos para água tratada	54
Tabela 10 - Resultados exames microbiológicos para água tratada	56
Tabela 11 - Insumos e equipamentos utilizados para montagem, instalação e operação do fotorreator.....	57
Tabela 12 - Consumo de energia referente ao Fotorreator.	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivos.....	15
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	<i>15</i>
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	<i>15</i>
1.2	Estrutura do Trabalho	15
2.	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	Qualidade das águas	16
2.2	Etapas do tratamento de água para consumo humano	17
2.2.1	<i>Pré-oxidação.....</i>	<i>18</i>
2.2.2	<i>Coagulação.....</i>	<i>19</i>
2.2.3	<i>Floculação</i>	<i>20</i>
2.2.4	<i>Decantação</i>	<i>21</i>
2.2.5	<i>Filtração</i>	<i>22</i>
2.2.6	<i>Desinfecção.....</i>	<i>24</i>
2.3	Tecnologia alternativa aplicada a desinfecção de águas	25
2.4	Radiação Ultravioleta	26
2.4.1	<i>Propriedades das fontes artificiais</i>	<i>27</i>
2.4.2	<i>Fonte de emissão</i>	<i>30</i>
2.4.3	<i>Efeitos da radiação germicida UV-C</i>	<i>32</i>
2.4.4	<i>Intensidade de Radiação.....</i>	<i>33</i>
2.4.5	<i>Mecanismos de inativação e dose.....</i>	<i>34</i>
2.4.6	<i>Reator Fotoquímico</i>	<i>35</i>
3	METODOLOGIA.....	37
3.1	Classificação do método	37
3.2	Água de estudo	37
3.3	Setup do experimento	38

3.4	Procedimento experimental	39
3.4.1	<i>Descrição dos experimentos</i>	39
3.4.2	<i>Caracterização físico-química e microbiológica da água de estudo</i>	42
3.5	Avaliação econômica da energia consumida pelo processo aplicado.....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1	Concepção definida do fotorreator	44
4.2	Caracterização da água de estudo (água bruta)	45
4.2.1	<i>Resultados físico-químicos para a água bruta</i>	45
4.2.2	<i>Resultados dos exames microbiológicos para as amostras de água bruta</i>	47
4.3	Resultados para experimentos de tratamento da água de estudo obtidos em bancada.....	48
4.3.1	<i>Resultados do tratamento da água de estudo obtidos em bancada, com vazão de 0,4 L/min.....</i>	48
4.3.2	<i>Resultados do tratamento da água de estudo obtidos em bancada, com vazão de 0,8 L/min.....</i>	51
4.4	Comparação entre os resultados dos experimentos de bancada (0,4 L/min e 0,8 L/min).....	52
4.5	Resultados da água tratada para a melhor condição operacional obtida	54
4.5.1	<i>Resultados Físico-químicos</i>	54
4.5.2	<i>Resultados dos exames microbiológicos</i>	56
4.6	Avaliação dos custos de implementação do processo	57
5	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

A busca do homem por melhores condições de vida fez com que o mesmo migrasse do campo para as cidades. Nesse processo de migração denominado êxodo rural, houve um grande crescimento da população de maneira desordenada, ocasionando alguns problemas como: construções em locais inapropriados, lançamentos de resíduos em rios e lagos, desmatamentos, proliferação de doenças causadas pela falta de saneamento e por contaminação da água, entre outros (BITTENCOURT; PAULA, 2014).

Segundo Mondardo (2004), com o grande crescimento populacional de centros urbanos, a população muitas vezes fica sujeita a utilizar água contaminada. Nas regiões semiáridas, como é o caso de boa parte do estado do Ceará, soma-se às contaminações a própria condição climática, que proporciona baixas pluviosidades, resultando em um cenário de escassez hídrica (BARBOSA, 2016).

O Brasil é um dos países que detém as maiores reservas de água doce do planeta, estima-se em cerca de 12% do total de água do planeta. No entanto, existe a má distribuição natural dessa água no território, que acaba afetando algumas regiões do país. Além da desigualdade da distribuição natural desse recurso, existem outros problemas como usos intensivos de água por diferentes atividades econômicas, poluição hídrica que contamina a água, no qual demandam de mais ações para controle da qualidade da água e gestão dos recursos hídricos (BRASIL, 2019b).

De acordo com Brasil (2019a), existem 662,6 mil quilômetros de redes para o abastecimento de água distribuídos nos municípios brasileiros, que estão conectadas a 57,2 milhões de ligações de água. No ano de 2018, foi constatado um aumento de 2,1% no número de ligações de água, o que corresponde 1,2 milhão de novos pontos de abastecimento de água.

De acordo com os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS, 83,6% dos brasileiros são atendidos com a rede de abastecimento de água. Isso significa um total de quase 35 milhões de brasileiros sem o acesso a este serviço básico. Se tratando da região Nordeste, apenas 74,2% são atendidos com a rede de abastecimento de água (BRASIL, 2019a).

Segundo Campos *et al.* (2017), a qualidade da água para consumo tem relação direta com a saúde da população, em que o consumo de água contaminada pode ocasionar doenças como disenterias, febre tifoide e paratifoide, cólera, entre outras.

As tecnologias de tratamento de água para consumo humano devem ser capazes de adequar a qualidade de águas impróprias ao consumo, atendendo aos padrões de potabilidade

estabelecido na Portaria GM/MS nº 888, de 04 de maio de 2021, do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2021).

De acordo com Meyer (1994), a desinfecção tem como principal função a inativação ou destruição de organismos patogênicos ou outros organismos indesejáveis, os quais são resistentes, podendo sobreviver na água durante várias semanas com temperaturas aproximadas de 21°C e por vários meses em baixas temperaturas. Esses organismos dependem da temperatura e outros fatores para sobreviver na água, como fatores ecológico, fisiológicos e morfológicos, sendo eles: pH, turbidez, oxigênio, nutrientes, resistência a substâncias tóxicas, habilidades na formação de esporos e conflitos com outros organismos.

Segundo White *et al.* (1999) e Di Bernardo (2005), a desinfecção pode ser realizada por agentes químicos e físicos. Os agentes químicos mais utilizados são os oxidantes: cloro, dióxido de cloro, bromo, iodo, ozônio, permanganato de potássio, ferrato de potássio, peróxido de hidrogênio, ácido peracético e os íons metálicos prata e cobre. No entanto, entre os agentes físicos, destacam-se apenas o calor e a radiação ultravioleta (UV).

Conforme a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (USEPA, 1999) e Zarpelon e Rodrigues (2002), a presença dos compostos orgânicos naturais (CONs) em águas de abastecimento público que foram desinfetadas com cloro ou seus derivados promovem a formação de compostos orgânicos halogenados, denominado de trihalometanos (THM), no qual são nocivos à saúde humana, esses compostos surgem em decorrência da reação química entre os compostos orgânicos e o cloro livre adicionado na etapa de desinfecção na água tratada.

Segundo Komulainen (2004), os subprodutos da desinfecção apresentam perigo eminente de causar câncer. Para Nakagawa, Silva e Arnesen (2017), as concentrações, assim como o tempo de exposição a esses compostos, são fundamentais para avaliar o potencial de enfermidade para a população que será abastecida com água que contenham esses compostos.

De acordo com Abdala Neto (2012), as águas submetidas à cloração têm despertado o interesse de vários pesquisadores ao redor do mundo, particularmente, na averiguação do surgimento dos subprodutos da desinfecção quando as águas possuem matéria orgânica natural (ácidos fúlvicos e húmicos), biomassa fitoplanctônica etc. Com essas averiguações, motivou-se a demanda por desinfetantes alternativos ao cloro. Outros fatores como a sucessiva evolução dos padrões de potabilidade estabelecidos pelos órgãos de controle e a confirmação de microrganismos mais resistentes à ação do cloro, principalmente os cistos e oocistos de protozoários, também suscitam a busca de tecnologias alternativas aos oxidantes de cloro e seus derivados.

Portanto, esta pesquisa tem como proposta de estudo, a aplicação de uma tecnologia de desinfecção de baixo custo baseada na radiação UV-C, com intuito de ampliar a oferta hídrica da região, por meio de tecnologias de desinfecção de água que não ocasionem a formação dos subprodutos cancerígenos, como os trihalometanos (THM) e os ácidos haloacéticos (AHA).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a aplicabilidade da radiação UV-C como alternativa para desinfecção da água da lagoa de Messejana, visando o consumo humano.

1.1.2 Objetivos específicos

- Conceber, montar e operar o fotorreator UV em regime contínuo;
- Avaliar o uso da tecnologia UV com coletas de amostras para a caracterização físico-química e microbiológica das águas bruta e tratada;
- Verificar a eficiência da aplicação da tecnologia proposta como alternativa de desinfecção da lagoa de Messejana-CE, avaliando a adequação de parâmetros físico-químicos (análises físico-químicas) e microbiológicos;
- Avaliar os custos envolvidos na aplicação da tecnologia UV como alternativa para desinfecção da água da lagoa de Messejana-CE.

1.2 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco seções: Na primeira seção, foi realizada a contextualização da problemática sobre a desinfecção de água, apresentando os objetivos almejados nos resultados; Na segunda seção, expressa-se o conteúdo abordado neste trabalho, por meio de outros autores que já realizaram estudos similares, caracterizando dessa forma a revisão de literatura; Terceira seção, descreve a metodologia utilizada na elaboração desse trabalho acadêmico. Quarta seção, serão tratados os resultados obtidos através dos experimentos e análises laboratoriais, considerando o objeto de estudo apresentado e ao final, na quinta seção, serão expressadas as conclusões baseadas nos resultados alcançados, revelando a importância desse trabalho para a sociedade acadêmica.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Esta seção abrange os trabalhos que correlacionam os estudos realizados sobre o assunto do tema proposto, na qual serão abordados os assuntos como qualidade das águas, etapas do tratamento de água para consumo humano, tecnologia alternativa aplicada a desinfecção de águas e a radiação ultravioleta aplicado no processo de desinfecção da água.

2.1 Qualidade das águas

Segundo Bittencourt e Paula (2014), a água pode ser utilizada para diversas atividades, como consumo humano, agricultura, indústria, lazer, entre outras. No entanto, para cada atividade específica, existe um padrão de qualidade exigido.

A qualidade das águas depende de várias condições e fatores que podem estar relacionados direto ou indiretamente com as ações do homem, essas condições podem ser geológicas e geomorfológicas, relacionadas com a cobertura vegetal da bacia hidrográfica, da atuação dos ecossistemas terrestres e de águas doces. As ações do homem que mais influenciam a qualidade da água podem ser: lançamento de cargas de matéria orgânica e inorgânica nos sistemas hídricos, modificação do uso do solo rural e urbano e modificações no sistema fluvial (TUCCI; HESPANHOL; NETTO, 2001).

Para Di Bernardo (1995), as características da bacia hidrográfica influenciam na qualidade da água bruta de um manancial, estando incluídos o clima, a hidrologia, geologia, morfologia, pedologia, uso e ocupação do solo etc.

Com a poluição dos recursos hídricos, altera-se características físicas (tensão superficial, viscosidade, condutividade, temperatura, turbidez etc.), químicas (toxicidade, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), potencial hidrogeniônico (pH) e/ou biológicas (espécies do zooplâncton e do fitoplâncton) das águas. Várias doenças estão associadas à contaminação biológica da água, dentre elas pode-se citar as principais como: viroses, amebíase, salmonelas, disenteria bacilar, giardíase, febre tifoide, cólera e outros. (DI BERNARDO *et al.*, 2005).

A água é um dos elementos essenciais para nossas vidas e para que seja disponibilizada para o consumo, deve atender os padrões de potabilidade estabelecidos na Portaria GM/MS nº 888, de 04 de maio de 2021, do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2021). No qual, são estabelecidos os parâmetros físico-químicos e parâmetros microbiológicos. No Quadro 1, são apresentados os parâmetros microbiológicos e seus respectivos padrões

estabelecidos pela legislação supracitada.

Quadro 1 - Padrão microbiológico da água para consumo humano

TIPO DE ÁGUA		PARÂMETRO		VALOR MÁX. PERMITIDO
Água para consumo humano		<i>Escherichia coli</i> ¹		Ausência em 100 mL
Água tratada	Na saída do tratamento	Coliformes totais ²		Ausência em 100 mL
	No sistema de distribuição (reservatórios e rede)	<i>Escherichia coli</i>		Ausência em 100 mL
		Coliformes totais ³	Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem menos de 20.000 habitantes	Apenas uma amostra, entre as amostras examinadas no mês, poderá apresentar resultado positivo
			Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem a partir de 20.000 habitantes	Ausência em 100 mL em 95% das amostras examinadas no mês.

Fonte: Produzida pelo autor, adaptada de Brasil (2021).

Em que:

*Escherichia coli*¹ – é um indicador de contaminação fecal;

Coliformes totais² – é um indicador de eficiência de tratamento.

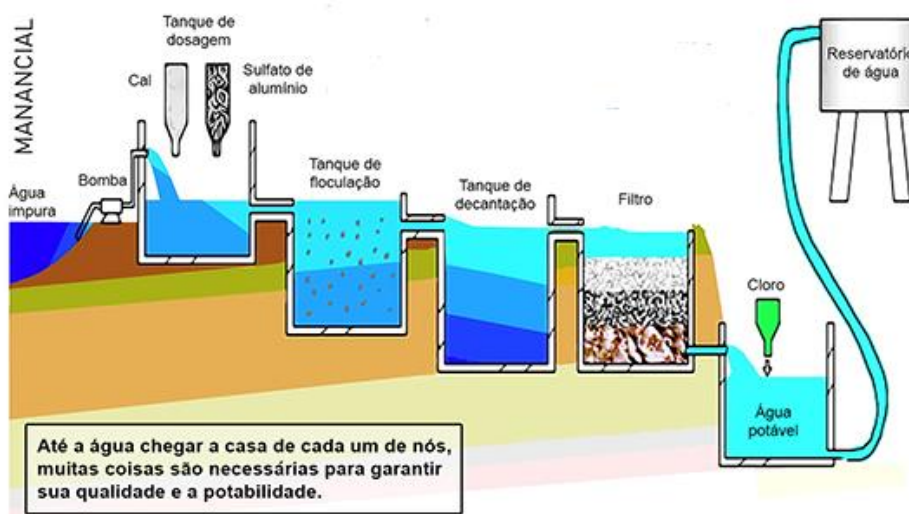
Coliformes totais³ – é um indicador de integridade do sistema de distribuição (reservatório e rede).

Segundo Brasil (2012), o princípio de múltiplas barreiras tem por finalidade evitar, reduzir, eliminar ou minimizar a contaminação. Se aplicado, este princípio poderia reduzir a degradação dos recursos hídricos, consecutivamente uma redução nos custos no tratamento e o risco à saúde da população. Isto abrangeria principalmente, a proteção dos mananciais (nascentes, reservatórios naturais e artificiais), acompanhado da coleta, transporte e disposição final apropriada dos: resíduos sólidos (envolvendo a redução do lixo produzido, reciclagem e reuso), de águas residuárias e o tratamento da água. Desse modo, a desinfecção continuaria sendo uma barreira e possuindo sua fundamental importância na saúde da população, porém não seria a única, como é utilizada em muitas cidades atualmente.

2.2 Etapas do tratamento de água para consumo humano

De acordo com Abreu (2017) o sistema de abastecimento de água é formado por uma série de etapas até chegar em nossas residências, conforme apresentado na Figura 1. Inicialmente a água é captada podendo ser superficial ou subterrânea e em seguida, pré-oxidada, coagulada, floculada, decantada, filtrada e desinfetada. Esse tipo de tratamento é denominado sistema de tratamento de água convencional ou completo.

Figura 1 - Etapas de tratamento de águas para consumo humano



Fonte: Universidade Federal rural de Pernambuco [20--].

Essas etapas de tratamento são realizadas nas Estações de Tratamento de Água (ETA's) e tem como finalidade adequar a qualidade da água ao padrão de potabilidade, estabelecidos na Portaria GM/MS nº 888, de 04 de maio de 2021, do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2021).

2.2.1 Pré-oxidação

Na ETA, após a água ser captada no manancial, geralmente de origem superficial, ela passa pela peneiração/gradeamento para impedir a entrada dos sólidos grosseiros (troncos, galhos, folhas, animais etc.), logo em seguida, a água passa pelo processo de pré-oxidação (TRATA BRASIL, 2020).

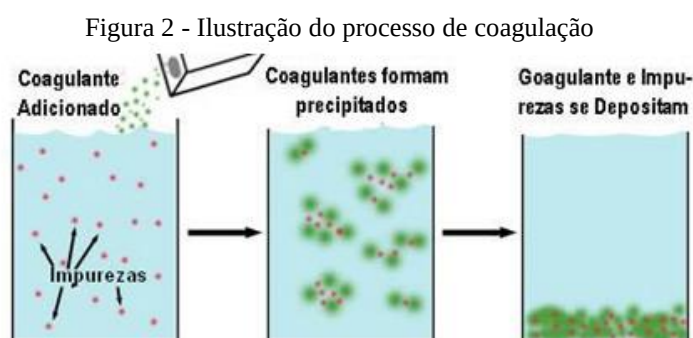
Conforme Nakagawa, Silva e Arnesen (2017), a etapa de pré-oxidação é aplicada em algumas ETA's com objetivos de atender diferentes finalidades, sendo o objetivo principal, reduzir a carga orgânica. Um dos principais agentes químicos utilizados na pré-oxidação é o cloro e seus derivados. No entanto, para águas que possuem altos valores de teor de matéria orgânica, pode-se formar os subprodutos como os Trihalometanos (THMs) e os ácidos Haloacéticos (HAAs) dentre outros. Para evitar a produção destes subprodutos podem ser utilizados oxidantes alternativos tais como: a radiação ultravioleta, peróxido de hidrogênio (H_2O_2), ácido peracético ($C_2H_4O_3$), Processos Oxidativos Avançados (POA's).

Segundo Vasconcelos Junior (2019), a pré-oxidação com cloro é usualmente

aplicada na maioria das ETA's, mas o peróxido de hidrogênio (H_2O_2) já vem sendo utilizado por outros países, pois é um oxidante líquido potente, não introduz subprodutos contaminantes na água tratada, portanto controla a formação de THMs e HAAs.

2.2.2 Coagulação

A coagulação é uma etapa do tratamento de água que envolve a adição de coagulante, responsáveis por unir as pequenas partículas de modo que consigam se sedimentar por gravidade na próxima etapa de decantação ou nos filtros, conforme ilustrado na Figura 2, facilitando a remoção na etapa de decantação. Nesta etapa de coagulação, é realizado o processo químico onde as suspensões e soluções coloidais, que são as responsáveis pela cor na água e turbidez, são desestabilizadas através dessa adição de coagulantes. Quando o coagulante entra em contato com o meio aquoso, as espécies químicas resultantes da hidrólise do coagulante irão interagir com as demais espécies presentes na água, desse modo, desestabilizam os coloides. A desestabilização ocorre no instante que o coagulante é aplicado à água e demora frações de segundos. A coagulação depende das características da água bruta: turbidez, cor, pH, sólidos totais dissolvidos (TDS), alcalinidade, temperatura e intensidade de agitação denominada de mistura rápida. (MONDARDO, 2004).



Fonte: Naturaltec, [20--].

Os coagulantes como sulfato de alumínio, sulfato ferroso, cloreto férrico entre outros, conforme apresentado no Quadro 2, são insolúveis na água, no entanto, eles geram íons positivos (cátions) que conseguem atrair as impurezas que estão carregadas negativamente na água. No Brasil o coagulante mais utilizado é o sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$) (TRATA BRASIL, 2020).

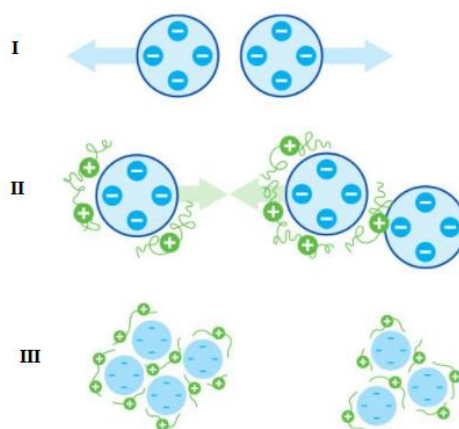
Quadro 1 - Produtos utilizados na coagulação.

Coagulantes	Auxiliares de Coagulação	Alcalinizantes
Sulfato de Alumínio	Argila	Óxido de Cálcio
Sulfato Ferroso	Polieletrólitos	Cal Hidratada
Cloreto Férrico	Sílica Ativada	Soda Cáustica
Sulfato Férrico	Carbonato de Sódio	
Alumina de Sódio		

Fonte: Brasil (2014).

Para Toledo (2020), o processo de coagulação ocorre a união das pequenas partículas para formar flocos maiores e essas pequenas partículas normalmente estão carregadas negativamente em suas superfícies, impedindo assim a união e estabilização, conforme o item I da Figura 3, com a adição dos coagulantes, serão fixados às partículas, realizando um equilíbrio de cargas e formando flocos submícrons estáveis, conforme item II da Figura 3. O ideal para a dispersão dos coagulantes químicos é mistura rápida, pois irá ocasionar o encontro das partículas, conforme mostrado no item III da Figura 3.

Figura 3 - Ilustração do processo de coagulação



Fonte: Produzida pelo autor, adaptada de Toledo (2020).

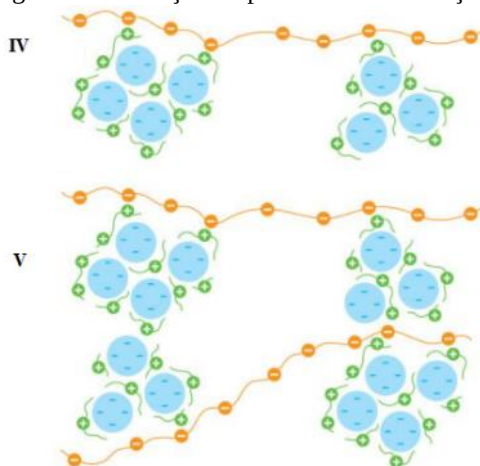
2.2.3 Floculação

Processo onde ocorre a mistura lenta na água para aumentar a dispersão do coagulante, realizando assim uma aglomeração das partículas que foram desestabilizadas na etapa da coagulação, dessa forma resultará em partículas maiores e mais densas, que serão removidas na etapa seguinte do tratamento (MONDARDO, 2004).

Segundo Toledo (2020), a Floculação necessita de um processo de mistura lenta e utiliza-se um floculante polimérico com elevado peso molecular, esses floculantes ficam

fixados aos flocos submicrons facilitando o preenchimento dos espaços entre os flocos, conforme o item IV da Figura 4. As partículas ao se aproximarem, permitem a eficiência da força de atração e reduzem a barreira energética para a floculação e assim formarão flocos inicialmente com ligações fracas, onde irão adquirir maior resistência em suas ligações em função dos choques promovidos pela mistura lenta, formando posteriormente os macroflocos com peso e tamanho maior que os levarão à sedimentação, conforme item V da Figura 4.

Figura 4 - Ilustração do processo de floculação

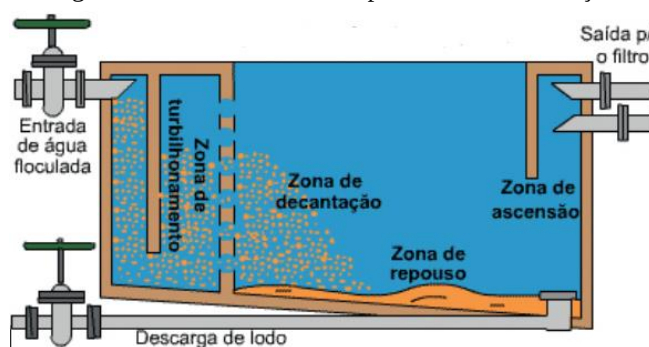


Fonte: Produzida pelo autor, adaptada de Toledo (2020).

2.2.4 Decantação

Esse processo tem como objetivo separar os sólidos que foram agrupados nas etapas anteriores (coagulação e floculação) através da sedimentação conforme apresentado na Figura 5, isso ocorre devido as partículas formadas possuírem formas maiores e mais densas, logo essa sedimentação ocorrerá pela ação da gravidade (BITTENCOURT; PAULA, 2014).

Figura 5 - Funcionamento do processo de decantação



Fonte: Brasil (2014).

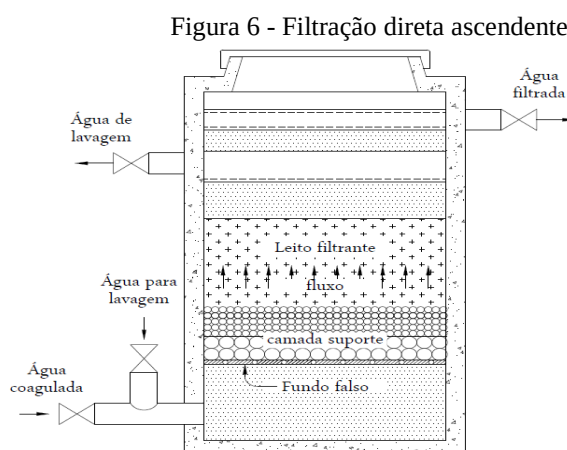
De acordo com Brasil (2014), geralmente a decantação ocorre em tanques retangulares providos com fundos inclinados e pontos de descarga que facilitam a remoção das partículas decantadas no fundo dos tanques. O período teórico para que ocorra a decantação é obtido através do volume do tanque dividido pela vazão, contudo fatores como a temperatura da água, vento entre outros, acabam influenciando na decantação,

2.2.5 Filtração

Conforme apresentado por Richter (2009), o primeiro registro de instalação de filtração para tratamento de água, foi atribuído a John Gibb, onde realizou um filtro lento de areia em Paisley – Escócia, no ano de 1804. Na Inglaterra, em 1852 a filtração da água de rios para consumo se tornou obrigatória. Em 1892 ocorreu o surto de cólera, onde notou-se a eficiência da filtração da água na cidade de Altona, onde formava com a cidade de Hamburgo um único conjunto urbano abastecido pelo rio Elba, no período que ocorreu a epidemia, Altona tinha filtros lentos e não foram registrados casos de cólera, porém Hamburgo não possuía o sistema de filtração, no entanto, foram registradas 8.000 mortes.

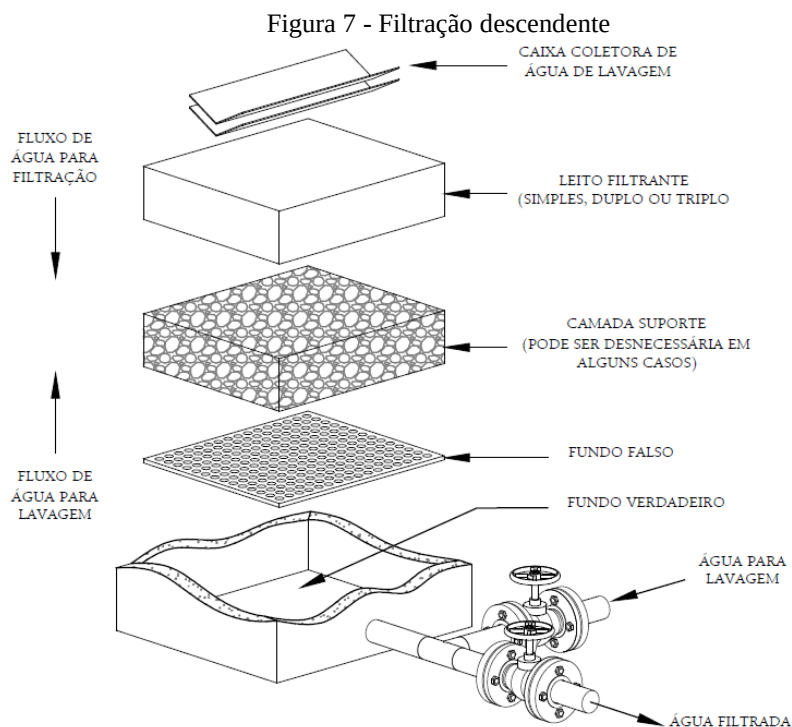
Após o processo de decantação a água é encaminhada para os filtros, onde é efetuado o processo de filtração. Os filtros são constituídos de um meio poroso granular, normalmente formados por camadas de areia ou areia e carvão ativado. Existem filtros com outras camadas de materiais para realizar a filtração, sendo camada de areia de grossa, areia fina, cascalho, pedregulho e carvão ativado, esses componentes serão capazes de reter as substâncias que passaram sem decantar-se nas etapas anteriores (SILVA, 2017).

A filtração que ocorre com o sentido do fluxo de baixo para cima, é denominada filtração direta ascendente conforme ilustrado na Figura 6 (ALCANTARA, 2010).



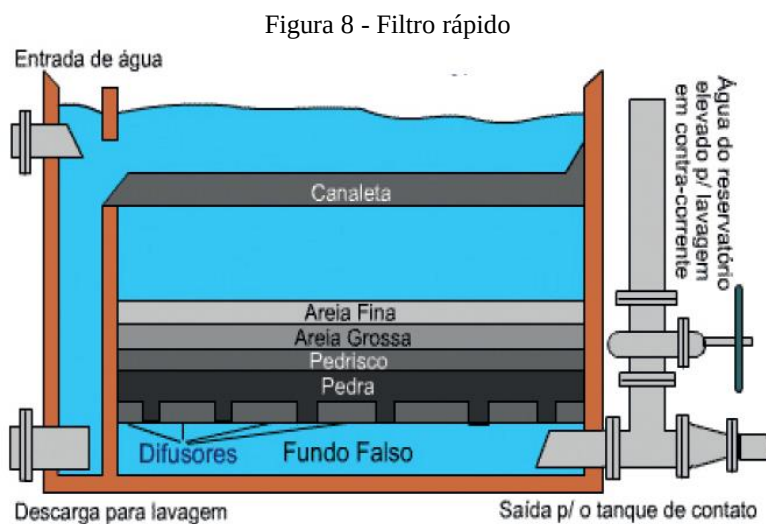
Fonte: Adapta de Ortiz (2013).

Quando a filtração ocorre no sentido de cima para baixo é denominada filtração descendente, conforme ilustrado na Figura 7 (ALCANTARA, 2010).



Fonte: Adapta de Ortiz (2013).

A classificação dos filtros pode ser de acordo com sua taxa média de filtração, são classificados como filtros lentos os que funcionam com taxa média de filtração entre 2 a $6\text{m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$ e filtros rápidos os que funcionam com taxa média de 120 a $600\text{m}^3/\text{m}^2/\text{dia}$, mostrado na Figura 8 (BRASIL, 2014).



Fonte: Brasil (2014).

Os filtros rápidos são limpos frequentemente, apenas aplicando a água a contrafluxo e a limpeza é realizada em menos de uma hora, já os filtros lentos a limpeza é mais demorada, possuindo uma menor periodicidade de limpeza, normalmente a limpeza é manual, onde é retirada a camada da superfície do leito que estão acumuladas as impurezas (RICHTER,2009).

Segundo Abreu (2017), a etapa de filtração representa uma barreira sanitária no processo de tratamento de água, pois é através dela que se inicia a remoção de microrganismos patogênicos.

2.2.6 Desinfecção

A desinfecção consiste na inativação ou morte dos microrganismos patogênicos. Esta etapa pode ser realizada por meio de agentes químicos e físicos. Atualmente existem diversos métodos de desinfecção, dentre os agentes químicos mais utilizados são: oxidantes de cloro, dióxido de cloro, bromo, iodo, ozônio, permanganato de potássio, ferrato de potássio, peróxido de hidrogênio, ácido peracético e os íons metálicos de prata e cobre. Na desinfecção por agentes físicos se destacam apenas o calor e a radiação UV (SILVA 2017).

Segundo Velosa (2015), o cloro (Cl_2) é utilizado tanto na oxidação como na desinfecção no tratamento de água. Quando aplicado como oxidante, tem como objetivo controlar o crescimento biológico e eliminar os compostos que produzem sabor, odor e cor à água, remover ferro, manganês e outros compostos inorgânicos existentes na água, como o arsênio. No entanto, pode ser utilizado como pré-desinfetante, onde permite o controle da proliferação microbiana na rede de distribuição ou ainda como pós-desinfetante, que é aplicado após a utilização de outros desinfetantes como dióxido de cloro, ozônio ou radiação UV. De acordo com Richardson (2000), há um século, o cloro tem sido o agente oxidante e desinfetante mais utilizado na pré-oxidação de águas para consumo.

A adição de cloro e seus derivados na água deve seguir os limites com mínimo de 0,2 miligramas por litros (mg/L) e máximo de 2 mg/L de cloro residual livre, conforme estabelecido na Portaria GM/MS nº 888, de 04 de maio de 2021, do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2021), em que valores maiores que 2 mg/L de cloro irá deixar a água com gosto e cheiro.

Segundo Daniel *et al.* (2001), os agentes químicos utilizados na desinfecção têm possibilitado uma melhor qualidade de vida, reduzindo as doenças provocadas por águas contaminadas e redução da mortalidade infantil por doenças intestinais. Porém, pesquisas já mostraram que vários desses agentes químicos desinfetantes, por serem oxidantes poderosos,

podem formar os subprodutos da desinfecção, no qual são nocivos à saúde humana, como os compostos orgânicos halogenados, chamados de trihalometanos (THMs), resultante da reação entre os compostos orgânicos e o cloro livre presente na água tratada.

Além de causar a formação dos subprodutos, existem outros problemas relacionados com a utilização do cloro, sua ineficácia contra alguns microrganismos, como vírus, cistos da *Giardia lamblia* e os protozoários *Cryptosporidium* (um dos causadores de diarreia infecciosa), no qual o cloro possui sua maior deficiência em inativação. Segundo Furtado (2011), esses microrganismos causaram mortes por infecção no Canadá e nos Estados Unidos. Após comprovada essa ineficiência do cloro, várias cidades de países desenvolvidos, começaram a implantar novas soluções nas ETA's, porém no Brasil, essas implantações não ocorreram, devido a escassa fiscalização e monitoramento a cerca desses parasitas.

A formação desses subprodutos e outros, dependem principalmente do tipo de agente desinfetante utilizado, porém, vários fatores podem influenciar, como o tempo de contato, fatores ambientais (pH, alcalinidade, força iônica, temperatura etc.), qualidade da água, sequência de tratamento (DANIEL *et al.*, 2001).

2.3 Tecnologia alternativa aplicada a desinfecção de águas

Embora o cloro seja o agente químico de desinfecção de água mais utilizado e possuindo vantagens como baixo custo associado à eficiência com a facilidade de conservar a água potável, este elemento, em países desenvolvidos, no qual possuem controle ambiental mais rigorosos nas ETA's, já estão buscando alternativas capazes de substituir ou reduzir a aplicação do cloro. Essa busca por alternativas de desinfecção ao cloro está relacionada com a formação dos subprodutos cancerígenos originados (BILOTTA, 2000). De acordo com Daniel *et al.* (2001) vários países, dentre eles Canadá, Estados Unidos e alguns países da Europa começaram a utilizar novas tecnologias alternativas ao cloro na desinfecção de água. No Brasil, apesar de existirem restrições legais referente aos THM's, são poucas unidades que aplicam medidas para conter esses subprodutos.

Segundo Sousa Filho (2019), a maioria dos desinfetantes são a base de cloro, como hipoclorito de sódio, dióxido de cloro e gás cloro. Mas já estão sendo aplicadas novas tecnologias alternativas, sendo as mais utilizadas: ozônio, radiação UV, processo eletrolítico, desinfecção da água por sistema solar (SODIS), peróxido de hidrogênio e técnicas que utilizam a combinação de desinfetantes, sendo consideradas como processos oxidativos avançados (POAs).

Conforme Velosa (2015), a desinfecção realizada com a aplicação do ozônio (O_3) é denominada ozonização, é considerado um dos desinfetantes mais fortes no tratamento de água, possui uma maior eficiência na inativação dos microrganismos patogênicos quando comparado aos outros agentes desinfetantes, não gera subprodutos residuais, possui grande eficácia nas aplicações de baixas concentrações e em curtos tempos de contato, sua produção deve ser realizada no próprio local de aplicação, evitando dessa maneira os riscos com transporte e manuseio. Porém, ao ser produzido, deverá ser utilizado imediatamente, pois é um gás altamente instável.

Segundo Zarpelon e Rodrigues (2002), o ozônio tem como uma das desvantagem o pouco tempo de permanência no meio líquido, onde pode ocasionar uma recontaminação depois de sua aplicação para desinfecção da água. No entanto, é necessário a aplicação de outro desinfetante para que seja mantido a inativação dos organismos ao longo da rede de distribuição de água.

De acordo com Cazú (2019), a desinfecção por sistema solar (SODIS) é um método de desinfecção prático, com baixo custo e sustentável, onde utiliza energia solar e calor para a inativação dos microrganismos patogênicos. Porém esse método é ideal para aplicações domésticas e requer água com baixa turbidez (inferior a 30 Unidades Nefelométricas de Turbidez - UNT) para que consiga realizar a desinfecção.

2.4 Radiação Ultravioleta

A aplicação da radiação ultravioleta utilizada na etapa de desinfecção de água, surgiu após pesquisas por soluções de desinfecção alternativas à cloração. É um dos métodos utilizados para desinfecção de água que possui vantagens em comparação aos processos com utilização de agentes químicos, como a cloração e ozonização, pois não origina a formação dos subprodutos como trihalometanos e ácidos haloacéticos que são prejudiciais à saúde. Outra vantagem é a simples instalação, manutenção e menor requisito de área (VELOSA, 2015).

Segundo Daniel *et al.* (2001), As primeiras unidades de tratamento com radiação ultravioleta para desinfecção de água, ocorreram na Suíça e na Áustria, no ano de 1955 e após 30 anos, esses dois países possuíam cerca de 500 e 600 unidades instaladas, respectivamente. No Brasil, essencialmente na Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, foram realizadas as primeiras pesquisas no ano de 1977, com objetivo de aplicação da radiação ultravioleta na desinfecção de esgotos.

Conforme Tinôco (2011), em estudo realizado pela Agência de Proteção Ambiental

dos Estados Unidos (USEPA), após o descobrimento da formação dos subprodutos na desinfecção por cloração, a desinfecção UV se tornou comum na Noruega e Holanda, onde foram aplicados os primeiros reatores para tratamento de água em 1975 na Noruega e em 1980 na Holanda.

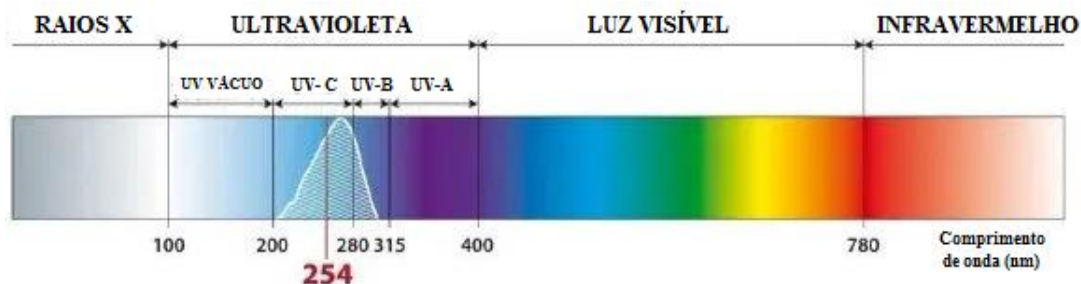
De acordo com Follmer *et al.* (2019), a desinfecção por radiação UV-C é bastante utilizada em aquários residenciais, pois não prejudica a saúde dos peixes e não gera resíduos. Podendo também ser utilizada no tratamento de ar, como em salas de laboratório, hospitais, hotéis, setor alimentício etc. A radiação UV-C já é utilizada como uma etapa complementar de desinfecção em algumas estações de tratamento de esgotos (ETE's) de São Paulo, sendo elas: a ETE Capuava na cidade de Valinhos, ETE's Anhumas e Souza's na cidade de Campinas, ETE's Monjolinho e Água vermelha na cidade de São Carlos, ETE da cidade de Barra Bonita.

Segundo PATTERSON *et al.* (2020), a exposição da luz UV-C aplicada a uma distância de 3 cm por 15 min em superfícies contaminadas, conseguiu inativar o vírus da síndrome respiratória aguda grave infecciosa coronavírus-2 (SARS-CoV-2). Essa demonstração foi realizada por meio da aplicação de energia UV $> 0,04 \text{ J /cm}^2$ resultando na inativação do vírus SARS-CoV-2, tornando-o não infeccioso. No entanto, recomenda-se que, para quaisquer alterações no substrato celular, vírus ou para novos operadores, o processo de validação seja repetido para garantir que nenhum vírus infeccioso permaneça após a inativação por UV.

2.4.1 Propriedades das fontes artificiais

A radiação ultravioleta está inclusa no espectro eletromagnético, possui comprimentos de onda menor que os da luz visível e maior que o dos raios X. Pode ser dividida em 4 categorias, conforme mostra a Figura 9. Essas categorias são classificadas de acordo com seus comprimentos de onda, sendo a primeira categoria a UV – vácuo possuindo comprimento de ondas entre 100 a 200 nm. Em seguida a categoria UV-C possuindo radiação de ondas entre 200nm a 280 nm, depois tem-se a UV-A que possui radiação de ondas longas, com dimensões aproximadas entre 315 a 400 nm, por último a categoria UV-B onde possui radiação de ondas médias, entre 280 a 315 nm. Na categoria UV-C está contida a faixa de radiação onde ocorre a ação germicida, ou seja, possui a capacidade de inativar os microrganismos, realizando dessa forma a desinfecção (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 2016).

Figura 9 - Espectro da luz ultravioleta



Fonte: Produzida pelo autor, adaptada de Aquamec (2020).

Segundo Tinôco (2011), a radiação proveniente da categoria UV-A, conhecida como luz negra, é bastante utilizada em câmaras de bronzeamento e em fototerapia. Em termos germicida é considerada desprezível, pois necessita de longos períodos de exposição para se obter efeitos na desinfecção. A radiação UV-B possui a maior capacidade de destruição dentre as categorias UV, estando associada diretamente ao câncer de pele. UV-vácuo possuem raios que são rapidamente dissipados em meio líquido em pequenas distâncias, portanto são inviáveis para o processo de desinfecção de água e esgotos.

Segundo Daniel *et al.* (2001), ao pesquisar sobre a influência dos comprimentos de onda na faixa de 253 nm, estudados por Bolton e Harm, observou que Bolton afirmava que o comprimento de onda de 254 nm possuía o maior efeito bactericida. E nas avaliações de Harn, a justificativa para esse maior poder germicida estava na maior taxa de absorção da radiação UV-C que acontece no espectro de emissão entre os comprimentos de onda 285 nm e 254 nm. Essa faixa de comprimento de onda, está relacionado com a emissão máxima das lâmpadas que possuem baixa pressão de vapor de mercúrio. Assim, pode-se considerar que para este intervalo de comprimento de onda, ocorre a faixa germicida, sendo o comprimento de 254 nm o pico de emissão da lâmpada UV-C, no qual possui o melhor efeito na inativação dos microrganismos, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição de energia de uma lâmpada UV-C

Comprimento de onda (nm)	Porcentagem relativa de emissão dentro da região	
	248-365 nm	248-313 nm
248	0,1	0,1
254	95,2	97,4
265	0,1	0,1
280/289	0,1	0,1
297	0,3	0,3
302	0,2	0,2
313	1,8	1,9
334	0,1	–
365	2	–

Fonte: Harm (1980) apud Daniel *et al.* (2001) p. 52.

A geração artificial da radiação UV, é obtida por meio da aplicação de uma tensão elétrica através de uma mistura de gases, isso resulta em uma descarga de fótons. No entanto, os comprimentos de ondas que são gerados através da luz emitida pela descarga dos fótons dependem do nível de potência da lâmpada e da composição química do gás e o número de fótons emitidos é governado pela potência da fonte de emissão. Os fótons são pequenos “pacotes” de energia, sendo esta energia (E) dependente da frequência de emissão e, inversamente proporcional ao comprimento de onda da luz (λ). Assim a quantidade energia pode ser calculada através da Equação 1 (TINÔCO, 2011).

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1)$$

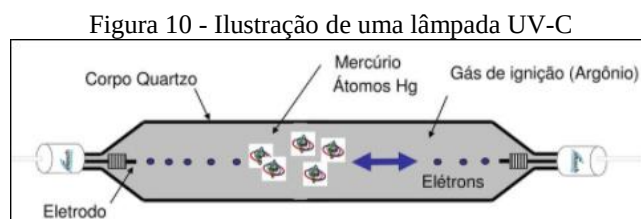
Sendo, E a energia de um determinado comprimento de onda Joules (J), h a constante de Planck ($6,026 \times 10^{-34}$ Js), c a velocidade da luz em metros por segundo (m/s) e λ o comprimento de onda em metros (m).

Segundo Daniel *et al.* (2001), caso uma molécula absorva um fóton e promova a fotólise (quebra pela luz), este deve possuir energia necessária e superior para quebrar uma ou várias ligações entre os átomos constituintes da molécula. Essa ocorrência geralmente está relacionada ao comprimento de onda na faixa do espectro associado à radiação UV. As moléculas de água quando recebem irradiação com comprimento de onda menor que 190 nm, acontece o rompimento das ligações gerando a formação dos radicais de hidrogênio e hidroxila, nos quais são potentes agentes redutores e oxidantes, nessa ordem. Desse modo o processo de desinfecção mesmo em meio aquoso ou no ar úmido, pode ser realizado utilizando como base essa ocorrência.

2.4.2 Fonte de emissão

Segundo Bastos (2007), a principal fonte de radiação ultravioleta que possuímos é a radiação do sol, porém a maior parte desta radiação antes de chegar à terra, é dissipada nas camadas da atmosfera e absorvida pelo ozônio. Mas o homem através de estudos desenvolveu a lâmpada UV, com comprimentos de ondas específicos. Essas lâmpadas podem distribuir radiação em todas as direções ao redor do seu eixo.

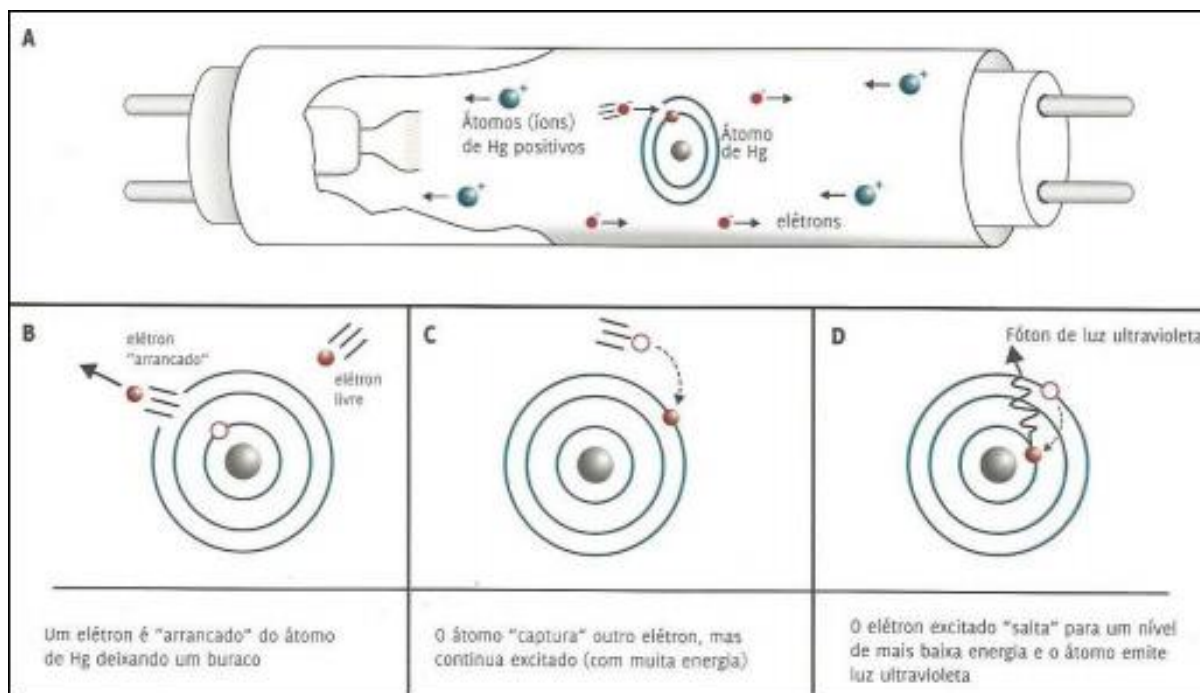
As lâmpadas UV podem ser fabricadas de quartzo ou outro material com características semelhantes de transmitância, para que possa permitir a irradiação máxima, conforme ilustrado na Figura 10, possuem extremidades composta por eletrodos de tungstênio com uma mistura de terra alcalina que facilita a formação do arco dentro da lâmpada. No interior do tubo é adicionado uma pequena quantidade de mercúrio e um gás inerte, normalmente o argônio, conforme mostrado na Figura 10 (BASTOS, 2007).



Fonte: Barbosa (2016).

Na Figura 11 apresenta-se o funcionamento interno de uma lâmpada UV-C, conforme mostrado no item A, com a movimentação dos elétrons e íons estes são continuamente recombinados, com a diferença de potencial entre os eletrodos, ocorre a transferência de elétrons (Figura 11-B). Os íons de mercúrio ao receber os elétrons, deixam de ser átomos ionizados (Figura 11-C), porém esses átomos apresentam níveis de energia acima do normal, deixando seus elétrons excitados. Esses elétrons excitados, tendem a “saltar” para um nível de menor energia (Figura 11-D), nesses “saltos” acontece a liberação de “pacotes” denominados de quantum de energia e nesse processo o átomo realiza a emissão da luz ultravioleta (BODAS; JARDIM; ERROBIDART, 2017).

Figura 11 - Funcionamento da lâmpada UV-C



Fonte: Paula, Alves e Mateus (2011).

Estas lâmpadas UV-C são comercialmente fornecidas em 3 tipos, sendo caracterizadas pelo gás em seu interior, onde pode ser gás de deutério, xenônio e mercúrio. As lâmpadas mais utilizadas possuem o vapor de mercúrio, pois possui melhores características quanto a estabilidade, facilidade de funcionamento, possui uma elevada eficiência energética capaz de realizar a conversão de energia elétrica para radiação (BARBOSA, 2016).

Segundo Tinôco (2011) o desempenho das lâmpadas UV-C pode estar relacionado a diversos fatores, destacando alguns como: Tempo de operação, temperatura, onde influenciam para o desgaste dos eletrodos.

Segundo Tchobanoglous *et al.* (2016), o espectro de emissão de radiação depende da pressão dos gases existente no interior do bulbo da lâmpada, portanto podem ser classificadas de acordo com seus parâmetros internos de operação, sendo classificadas como: lâmpadas de baixa pressão e baixa intensidade, lâmpadas de baixa pressão e alta intensidade e lâmpadas de média pressão e alta intensidade, na Tabela 2 são apresentadas algumas características destas lâmpadas.

Tabela 2 - Características das lâmpadas UV-C

Item	Unidade	Tipo de lâmpada		
		Baixa pressão Baixa intensidade	Baixa pressão Alta intensidade	Média pressão Alta intensidade
Consumo de energia	W	70 - 100	200 – 500	-
	kW	-	1.2	2-5
Corrente	mA	350 - 550	Variável	Variável
Tensão	V	220	Variável	Variável
Eficiência	%	30 - 40	25 - 35	10 -12
Potência	W	25 - 27	60 - 400	-
Temperatura	°C	35 - 45	90 - 150	600 - 800
Pressão	mmHg	0.007	0.001 - 0.01	-
Comprimento	m	0.75 - 1.5	Variável	Variável
Diâmetro	mm	15 - 20	Variável	Variável

Fonte: Tchobanoglous *et al.* (2016).

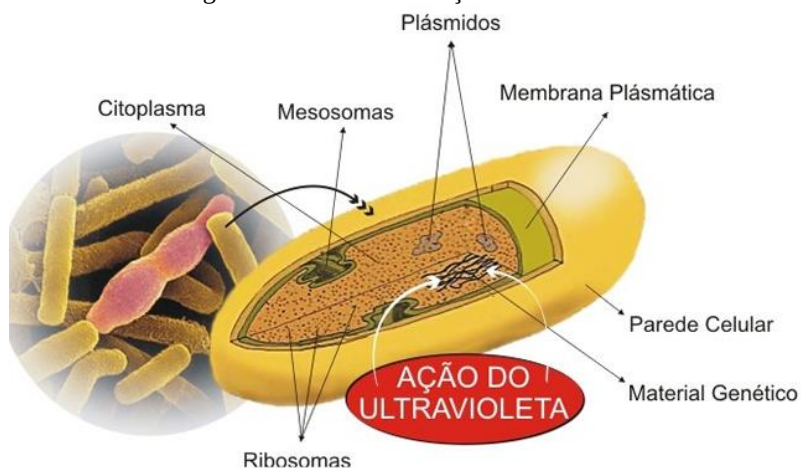
De acordo com Tchobanoglous *et al.* (2016), as lâmpadas mais utilizadas no processo de desinfecção de água para o consumo humano e no tratamento de esgotos são as de baixa pressão e baixa intensidade, onde possuem emissão entre 85 a 90% da sua capacidade energética no comprimento de onda de 254 nm. Essas lâmpadas, podem ser classificadas como monocromáticas, funcionam em uma temperatura ideal de 40 °C e com uma pressão de 0,007 mmHg, possuem uma vida útil entre 9000 a 13000 h, devido ao número de ciclos que estão submetidas, já os tubos de quartzo, que formam uma espécie de luva para isolar as lâmpadas UV, impedindo o contato direto com a água, possuem vida útil entre 4 a 8 anos.

2.4.3 Efeitos da radiação germicida UV-C

O sistema de radiação ultravioleta, consiste em um processo físico de desinfecção através da ação dos raios emitidos. Essa radiação atinge principalmente os ácidos nucleicos dos microrganismos ocasionando reações fotoquímicas que inativam os vírus e as bactérias sem alterar o pH e outras propriedades físico-químicas da água (RIZZO *et al.*, 2014).

O funcionamento da lâmpada UV-C para realizar a desinfecção consiste em métodos físicos, onde a radiação consegue atravessar a parede celular dos microrganismos por meio da energia eletromagnética e em seguida realizar a fotólise, onde ocorre a alteração da estrutura do DNA ou RNA dos organismos vivos, impedindo sua reprodução, conforme ilustrado na Figura 12 (BASTOS, 2007).

Figura 12 - Processo de ação da luz UV-C



Fonte: Naturaltec [20--].

Segundo Daniel *et al.* (2001), a desinfecção será mais eficiente em águas que possuam cor e turbidez de baixo valor, pois a luz necessita penetrar o meio aquoso, então deve-se levar em consideração a qualidade da água a ser tratada.

Segundo Tinôco (2011), o tratamento de água por radiação UV-C é um método de baixo custo de investimento, porém é eficiente e seguro. Pode ser aplicado em diversos casos, como: desinfecção de efluentes domésticos e industriais; eliminação de ozônio, de cloro e cloraminas; indústria farmacêutica, hospitais, aplicações clínicas, reuso de água, dentre outros.

2.4.4 Intensidade de Radiação

A intensidade de radiação gerada pelas lâmpadas, não deve ser considerada como uma constante, pois quando um feixe de radiação é aplicado em um meio absorvente, uma parte dessa radiação será absorvida pela distância, desse modo a intensidade da radiação diminui com o aumento da camada da lâmina líquida percorrida. Essa absorção é calculada pela lei de Beer-Lambert conforme descrito na Equação 2 (MOREIRA; SANTOS; COSTA JUNIOR, 2016).

$$\frac{I}{I_0} = e^{-a.c.L} \quad (2)$$

Em que, I é a intensidade de radiação (mW/cm^2) que atravessa a camada de água com espessura L em cm, I_0 é a intensidade de radiação emitida pela fonte na superfície (mW/cm^2), a é o coeficiente de extinção molar, dado em $\text{mol}/\text{L} \times \text{cm}$ (depende do tipo de substância absorvente, do comprimento de onda e temperatura) e c é a concentração da substância absorvente (mol/L).

A transmitância (T) representa a quantidade de luz UV-C (medida no comprimento de onda de 254nm, na trajetória de 1 cm) que consegue passar a camada de água. É uma das propriedades da luz UV-C que depende da transparência da água, no qual terá uma maior taxa de transmitância em águas mais transparentes e pode ser calculada pela Equação 3 (TINÔCO, 2011).

$$T = \frac{I}{I_0} \times 100 \quad (3)$$

A absorbância (A) pode ser calculada pela Equação 4 (MOREIRA; SANTOS; COSTA JUNIOR, 2016).

$$A = -\log T \quad (4)$$

Logo, ao aplicar a Equação (3) da transmitância na Equação (4) da absorbância, resultará na Equação 5.

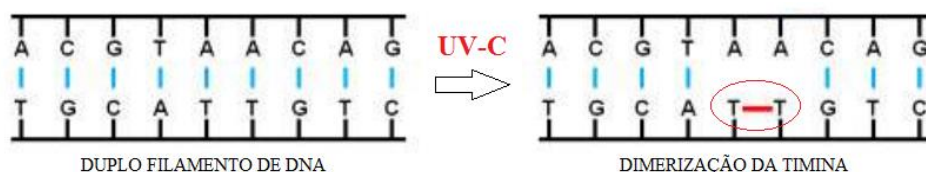
$$A = a \times c \times L \quad (5)$$

Em que A é absorbância, a é o coeficiente de extinção molar, dado em mol/L x cm (depende do tipo de substância absorvente, do comprimento de onda e temperatura), c é a concentração da substância absorvente (mol/L) e o L é a espessura da camada de água (cm).

2.4.5 Mecanismos de inativação e dose

Segundo Daniel *et al.* (2001), a radiação UV-C possui um mecanismo de inativação diferente dos agentes desinfetantes que são normalmente utilizados na desinfecção de águas, no qual, a radiação UV-C não realiza a inativação dos microrganismos por meio de reações químicas e sim pelo processo fotoquímico, ou seja, pela absorção da luz com alta energia, que provoca alterações nos componentes moleculares das células de modo que promova a inativação das mesmas e resulte no impedimento de sua reprodução. A inativação dos microrganismos ocorre principalmente no material genético (DNA/RNA) que é formado por bases nitrogenadas juntas por pontes de hidrogênio, que ao receber a luz UV-C, essas pontes de hidrogênio são rompidas, ocasionando a dimerização da timina, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Resultado da ação UV-C nos filamentos de DNA



Fonte: Adaptada de Tinôco (2011).

A dose da radiação UV-C está relacionada com a sua intensidade de radiação e o tempo de exposição aos microrganismos, entretanto, é possível realizar a inativação de uma quantidade fixa de microrganismos aplicando a radiação UV-C em um grande período de tempo e com baixa intensidade ou em uma pequena quantidade de tempo com elevada intensidade, desse modo a dose permanece constante onde pode ser calculada através da Equação 6 (DANIEL *et al.*, 2001).

$$D = I \cdot t \quad (6)$$

Em que, D é a dose de radiação, na unidade de mWs/cm^2 ou mJ/cm^2 , I é a intensidade de radiação em mW/cm^2 e t é o tempo de exposição em segundos.

Segundo Daniel *et al.* (2001), após a aplicação da radiação UV-C pode ocorrer a recuperação de alguns microrganismos inativados (processo denominado de fotorreativação). É possível calcular a fração de sobrevivência dos microrganismos, utilizando a Equação 7. A fotorreativação ocorre devido a reversão das reações fotoquímicas causadas pela irradiação de luz na faixa do visível, no entanto para evitar esse problema durante o dimensionamento de instalações de desinfecção, é necessário a aplicação da correta dose de UV-C.

$$f(D) = \frac{N}{N_0} \quad (7)$$

Sendo, $f(D)$ a função da dose de radiação, N a concentração de microrganismos antes da aplicação da radiação, em organismos/100 mL e N_0 a concentração de microrganismos após a aplicação da radiação, em organismos/100 mL.

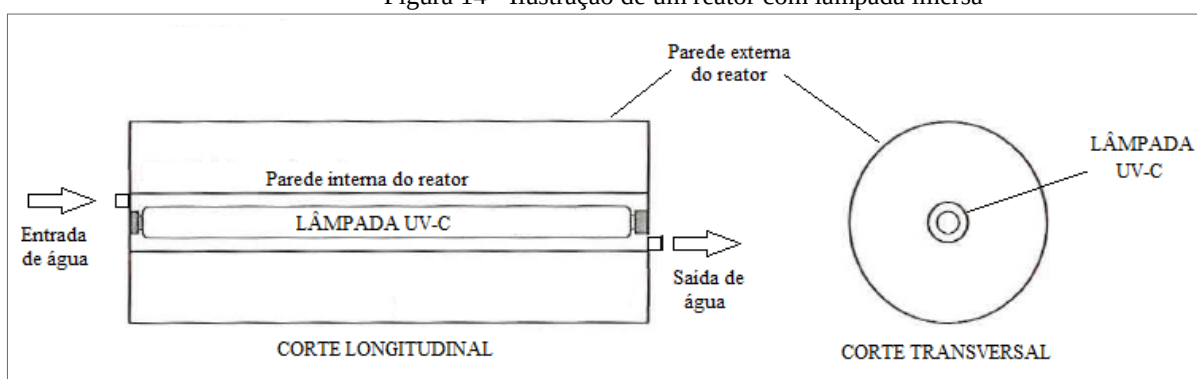
2.4.6 Reator Fotoquímico

Segundo Daniel *et al* (2001), o reator consiste em um recipiente onde acontecem as

reações de consumo ou decaimento dos reagentes e geração de produtos, nesse caso, a desinfecção da água.

O reator fotoquímico também chamado de câmara de reação, pode ser classificado quanto ao posicionamento da lâmpada, horizontal (paralelo ao fluxo) ou vertical (perpendicular ao fluxo), podendo ser imersa ou emersa no meio líquido. No caso de lâmpadas imersas a fonte luminosa com o reator cilíndrico são coaxiais e concêntricos, nesse caso, como o contato com o líquido é constante, é necessário a remoção da lâmpada para realizar a limpeza da parede interna do reator, conforme mostrado na Figura 14 (BILOTTA, 2000).

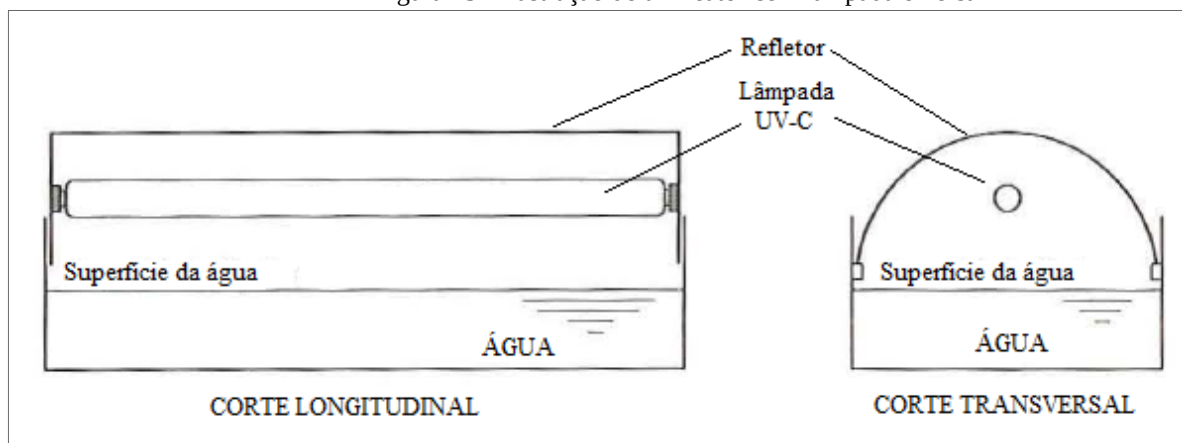
Figura 14 - Ilustração de um reator com lâmpada imersa



Fonte: Adaptada de Bilotta (2000).

Em reatores onde as lâmpadas estão emersa ao meio líquido, a fonte luminosa não tem contato direto com o efluente, a lâmpada fica distante alguns centímetros da superfície do líquido (água), sendo necessário a utilização de um refletor parabólico ou paralelepípedo para direcionar os raios UV-C ao líquido, conforme ilustrado na Figura 15 (BILOTTA, 2000).

Figura 15 - Ilustração de um reator com lâmpada emersa



Fonte: Adaptada de Bilotta (2000).

3. METODOLOGIA

3.1 Classificação do método

Este método se caracteriza como uma pesquisa experimental, com abordagem quantitativa e qualitativa. A metodologia descreve os procedimentos de coleta das amostras, análise dos dados obtidos e os materiais utilizados para a obtenção dos resultados.

3.2 Água de estudo

As amostras de água avaliadas foram coletadas na Lagoa da Messejana, localizada na cidade de Fortaleza no Estado do Ceará. Essa água utilizada nos experimentos apresenta características decorrentes de processos de contaminação urbana e pode ser considerada como representativa das águas de outros mananciais da cidade.

A lagoa de Messejana está inserida na bacia do Rio Cocó - Fortaleza- CE, com a seguinte coordenada geográfica: 3°49'47.78"S / 38°29'53.67"O. Essa lagoa é considerada como a segunda maior de Fortaleza, ficando atrás apenas da Lagoa da Parangaba.

A obtenção das coordenadas do manancial de estudo em questão pôde ser fornecida por meio de imagens de satélites através do programa Google Earth desenvolvido pela companhia Keyhole Inc®, conforme mostra a Figura 16.

Figura 16 - Localização geográfica da Lagoa de Messejana (Fortaleza/CE)



Fonte: Google Earth (2020).

3.3 Setup do experimento

Um fotorreator foi construído e equipado com uma lâmpada GERMICIDA da marca Philips, modelo TUV36T5/HO/G5 (High Output), conforme mostrado na Figura 17, com potência de 75 W, Intensidade de irradiação de $0,23 \text{ mw/cm}^2$, corrente de 0,8 A, base do tipo G5, bulbo T5 e radiação UV-C de 25 W, seu comprimento era de 120,0 cm e segundo o fabricante, sua vida útil é de 9000 h.

Figura 17 - Lâmpada UV-C

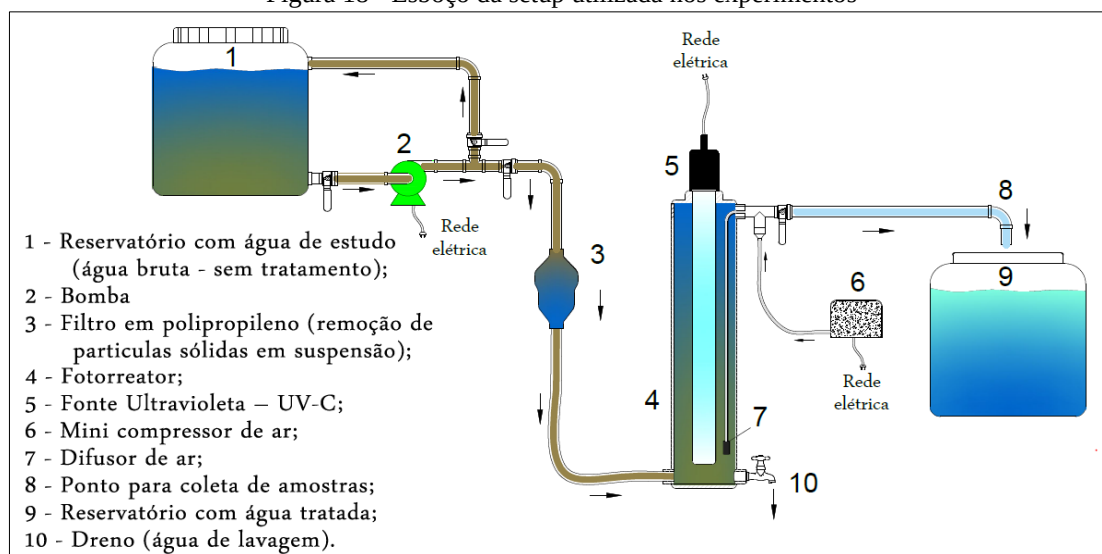


Fonte: Top Lâmpadas (2020).

Para aplicar oxigênio e produzir um turbilhonamento na água a fim de otimizar os efeitos da desinfecção, foi utilizado um mini compressor (aerador/oxigenador), de potência 2,8 W, consumo 2,016 Kw/mês (ligado 24 h/dia) com uma vazão de ar de 4 L/min e dimensões: 7 x 4 x 4 cm e peso de 110 g.

A lâmpada UV-C com comprimento total de 120 cm e diâmetro externo de 2,8 cm foi inserida no fotorreator de formato cilíndrico, fabricado em tubo PVC com diâmetro externo de 4,78 cm, diâmetro interno de 3,98 cm e comprimento de 110 cm, conforme mostrado na Figura 18, resultando em um volume útil de $691,5 \text{ cm}^3$, que será o volume ocupado pela água em estudo.

Figura 18 - Esboço da setup utilizada nos experimentos



Fonte: Autor (2021)

A bomba hidráulica utilizada no experimento foi uma do tipo periférica, modelo BP 60–220 v, monofásica com potência elétrica de 370 W, corrente de 1,7 A, vazão máxima de 1,8 m³/h, diâmetro de sucção e recalque de 1 pol., com uma pressão máxima de 18 mca.

A coleta das alíquotas de efluente tratado, necessário para as análises físico-químicas e exames microbiológicos, foi realizada no ponto 8, na rede de saída de água tratada, localizado na parte superior do fotorreator, conforme apresentado na Figura 18.

3.4 Procedimento experimental

3.4.1 Descrição dos experimentos

Foi coletada cerca de 50 L de água bruta no ponto de coordenadas geográfica 3°49'39.37"S e 38°29'37.99"O, às 17:40 do dia 06 de Abril de 2021, conforme mostra a Figura 19. Foi utilizado um balde plástico de 8 L acoplado a uma corda para coletar água diretamente da lagoa, desta maneira foi possível encher a bombona sem a necessidade de entrar em contato direto com a água. Após a coleta, a bombona foi mantida sob refrigeração, sem congelamento, de forma a não alterar suas características físico-químicas e microbiológicas.

Figura 19 - Coleta da amostra de água



Fonte: Autor (2021).

No dia seguinte às 10:00 h esta amostra encontrava-se no Núcleo de Práticas Tecnológicas – NPT da Unichristus, onde foi possível preencher os frascos fornecidos pelo laboratório H₂O Analysis para realização dos exames microbiológicos e físico-químico da água bruta, conforme mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Frascos com água bruta para análise



Fonte: Autor (2021).

O procedimento experimental foi dividido em duas etapas. Na etapa 1, foram realizados os dois experimentos de bancada, em regime contínuo, em que a água de estudo (bruta) foi dirigida ao fotorreator utilizando-se a bomba hidráulica periférica, de modo a fornecer uma pressão suficiente para passar pelo filtro, removendo as partículas sólidas em suspensão. A vazão de trabalho foi fixada em 0,4 L/min e 0,8 L/min, respectivamente para o primeiro e segundo experimento, a vazão era controlada por meio de registros do tipo esfera e fechos rápidos instalados na linha de alimentação do fotorreator. Como a bomba hidráulica periférica possui uma vazão 30 L/min foi necessário inserir uma rede de retorno (*bypass*) no recalque da bomba hidráulica periférica para garantir as vazões pré-definidas e assim manter a água agitada constantemente.

Antes de cada experimento era realizada a aferição da vazão, utilizando-se um cronômetro e uma proveta graduada de 1 L. Procedendo-se da seguinte maneira: ao liberar o fluxo de água bruta que alimenta o fotorreator, marcava-se um minuto, e simultaneamente, media-se o volume de água liberado após a passagem pelo fotorreator.

No primeiro experimento, foi estabelecida a vazão de trabalho do sistema em 0,4 L/min, resultando em um tempo de detenção hidráulica no interior do fotorreator de 1 min e 43 s, ou seja, esse foi o tempo que água esteve exposta aos raios UV-C.

No segundo experimento, a vazão de trabalho do sistema foi aumentada para

0,8 L/min, resultando em um tempo de detenção hidráulica no interior do fotorreator de 56 s, ou seja, houve uma redução no tempo de detenção hidráulica, desta forma a água ficou por menos tempo exposta aos raios UV-C.

Dado o início dos experimentos, as coletas das amostras foram realizadas a cada 3 minutos de experimento, durante 18 minutos, totalizando 6 amostras para cada experimento, sendo essas alíquotas coletadas e devidamente identificadas em tubos do tipo Falcon (45 mL), conforme mostrado na Figura 21. As amostras foram armazenadas sob refrigeração para posterior análise dos parâmetros de turbidez, pH e TDS, com os equipamentos de bancada.

Figura 21 - Tubos de Falcon identificados de acordo com o tempo de coleta



Fonte: Autor (2021).

A etapa 2 consiste na repetição do experimento que apresentar o melhor resultado para o parâmetro de turbidez, na qual foi identificada pelo método nefelométrico por um turbidímetro portátil da Hach® 2100P™. Ao final desse experimento foi obtida a amostra de água tratada para realizar o exame físico-químico e microbiológico, conforme mostra a Figura 22.

Figura 22 - Frascos com a amostra de água tratada para análise



Fonte: Autor (2021).

3.4.2 Caracterização físico-química e microbiológica da água de estudo

A caracterização da água de estudo foi obtida por meio de análises físico-químicas e microbiológicas das amostras de água bruta e tratada por processo de radiação UV-C, objetivando a desinfecção, essas análises foram realizadas no Laboratório da H₂O ANALYSIS, localizado na cidade de Fortaleza - CE.

Para o conhecimento da qualidade microbiológica apresentada pela água de estudo (bruta e tratada), foram realizados os exames de coliformes totais e *Escherichia coli*, utilizando o método substrato enzimático que utiliza substratos cromogênicos e fluorogênicos hidrolisáveis para detectar simultaneamente enzimas produzidas por coliformes totais e *Escherichia coli*. Os exames para obter a quantificação das Bactérias heterotróficas foi realizado pelo método de contagem de placa heterotróficas. As alíquotas de água foram coletadas em Frascos de 100 mL esterilizados, fornecidos pelo laboratório, em seguida estes eram fechados, identificados e refrigerados para serem levados no mesmo dia ao laboratório.

Os resultados das análises e exames foram confrontados com os valores estabelecidos pelo Ministério da Saúde do Brasil, por meio da Portaria GM/MS nº 888, de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), que define o padrão de potabilidade de águas destinadas ao abastecimento humano.

Afim de nortear o entendimento das influências obtidas com o uso do fotorreator na água de estudo, foram monitorados, *in loco*, diretamente nos instrumentos de medida, os parâmetros e respectivos métodos analíticos e referências, conforme listados no Quadro 3.

Quadro 3 – Características dos parâmetros físico-químicos

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS		
PARÂMETROS	DESCRIÇÃO	APARELHOS
Turbidez	Valores medidos com turbidímetro de bancada, fabricado pela Hach Company, modelo 2100P. 87;	
Sólidos totais dissolvidos	Valores medidos com equipamento portátil, fabricado pela NEW TDSeEC meter, modelo A;	
pH	Potencial Hidrogeniônico – valores medidos através de potenciômetro fabricado pela Analion, modelo PM 608 e eletrodo combinado fabricado pela Analyser, modelo 2A13-FL.	

Fonte: Autor (2021).

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

3.5 Avaliação econômica da energia consumida pelo processo aplicado

O estudo de viabilidade econômica com o uso do processo de desinfecção pela radiação UV-C operado com energia elétrica, aplicado conforme as condições estudadas nesta pesquisa, será obtido por meio dos custos dos equipamentos, insumos necessários e pelo consumo energético, que foi realizado a partir da Equação (8) (KOBAYASHI *et al.*, 2006).

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

Sendo, $C_{energia}$ a energia consumida (Whm^{-3}), U a tensão elétrica aplicada (V), I a corrente elétrica (A), T o tempo de aplicação da corrente elétrica (h) e V o volume de efluente tratado (m^3).

Inicialmente foi calculado a quantidade de energia consumida por cada equipamento (bomba hidráulica periférica, lâmpada UV-C e mini compressor de ar) depois somou-se o consumo de todos os equipamentos, resultando no consumo de energia total do sistema.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

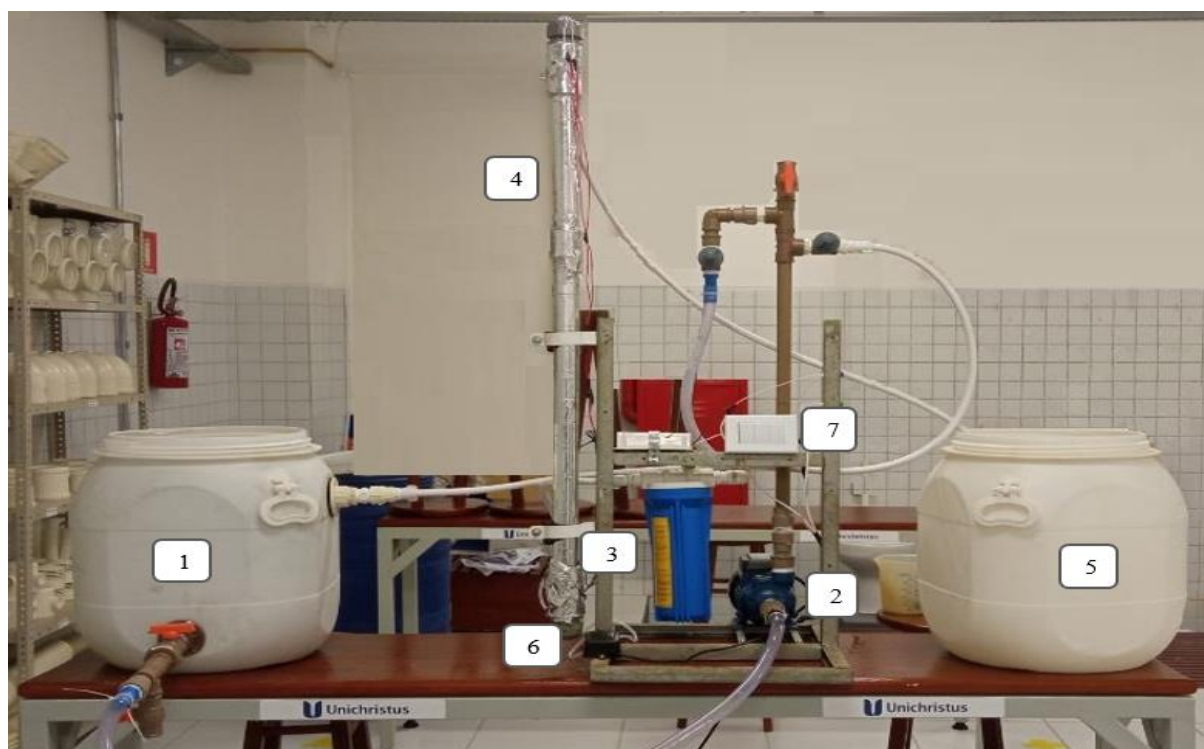
Nesta seção, serão detalhados os resultados obtidos com o sistema de tratamento por meio do fotorreator com a lâmpada UV-C, juntamente com o aerador e a bomba hidráulica periférica, ambos alimentados com energia elétrica, verificando-se a eficiência desse sistema de tratamento na inativação de microrganismos e seus custos de aplicação.

Ressalta-se que, no período de realização das análises e exames microbiológicos ainda estava em vigor a Portaria de Consolidação N° 5/2017, Anexo XX do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2017). Embora essa legislação tenha sido alterada para a Portaria GM/MS n° 888, de 04 de maio de 2021, do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2021).

4.1 Concepção definida do fotorreator

A concepção definida para o fotorreator foi realizada no laboratório do Núcleo de Práticas Tecnológicas – NPT da Unichristus, resultando em um sistema compacto e simples conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Fotorreator montado para os experimentos da referida pesquisa.



Legenda: 1 - Reservatório da água bruta; 2 - Bomba hidráulica periférica, modelo BP 60; 3 - Filtro de cartucho com retenção de partículas de 30 a 50µm para vazões de até 1200L/h; 4 - Fotorreator com a lâmpada UV-C; 5 - Reservatório da água tratada; 6 - Mini compressor de ar; 7 - Caixa de ligação elétrica para acionamento individual da bomba hidráulica e fotorreator. E os materiais necessários para interligações dos equipamentos, como: Mangueira plástica cristal 3/4pol, tubo PVC 3/4pol, registros 3/4pol, curvas, tês, adaptadores mangueira/rosca.

Fonte: Autor (2021).

A lâmpada UV-C ficava no interior do fotorreator, construído em tubo PVC e isolado com papel alumínio para assegurar o não vazamento de radiação para o meio externo. No entanto, a verificação de funcionamento da fonte UV-C, foi feita retirando-se a conexão de saída da rede do fotorreator, conforme mostrado na Figura 24. Para evitar acidentes, esse procedimento foi realizado com a utilização de proteções nos olhos, pois segundo Sousa Filho (2019) a exposição direta da luz UV-C é nociva para nossa pele e olhos

Figura 24 – Constatação de Lâmpada UV-C ligada, durante os experimentos.



Fonte: Autor (2021).

4.2 Caracterização da água de estudo (água bruta)

4.2.1 Resultados físico-químicos para a água bruta

Os resultados de caracterização para a água bruta, seguem apresentados na Tabela 3. Com a finalidade de comparar os resultados obtidos com os estabelecidos pela legislação que estabelece o padrão de potabilidade, também seguem apresentados, os valores máximos permitidos para as águas de abastecimento humano no Brasil, preconizados na Portaria GM/MS nº 888, de 04 de maio de 2021, do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2021). Vale ressaltar que, embora essa legislação tenha sido atualizada pelos órgãos de controle durante a realização desta pesquisa, não houve alteração nos valores máximos permitidos para os

parâmetros estudados. Assim sendo, estaremos referenciando, ao longo das discussões desta pesquisa quando necessário, sempre a legislação em vigor: Portaria GM/MS nº 888, de 04 de maio de 2021, do Ministério da Saúde do Brasil (BRASIL, 2021).

Tabela 3 - Resultados físico-químicos para água bruta, em destaque, os valores que se apresentaram acima do máximo estabelecido pela Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

Parâmetros	Resultados	VMP-PORT. GM/MS Nº888	Unidade	Método de determinação
pH à 25°C	8,010	6,0 a 9,5	-	SMWW, 23ª Edição, Método 4500 - B - Eletrometric Method
Amônia (NH ₃)	<0,300	até 1,500	mg/L	PTE-210.36:00
Cloretos	104,605	até 250,000	mg/L	SMWW, 23ª Ed., Método 4500Cl-B Argentometric Method
Cor Aparente	100,04	até 15,00	uH	SMWW, 23ª Edição, Método 2120B
Dureza Total	131,327	até 500,000	mg/L	SMWW, 23ª Edição, Método 2340C
Estimativa de TDS	336	até 1.000,000	mg/L	PEDROSA E CAETANO, 2002
Ferro	0,25	até 0,300	mg/L	SMWW, 23ª Edição, Método 3500-Fe B
Nitratos	<0,100	até 10,000	mg/L NO ₃ -N	SMWW, 23ª edição, Método 4500NO ₃ - D
Nitritos	<0,050	até 1,000	mg/L NO ₂ -N	SMWW, 23ª Edição, Método 4500NO ₂ -B
Sódio	84,9	até 200,000	mg/L	SMWW, 23ª Edição, Método 3500- Na B
Sulfato	27,5	até 250,000	mg/L	SMEWW 23ª Ed. 2012 Método 4500 SO ₄ - 2 E
Turbidez	9,09	até 5,000	UNT	SMWW, 23ª Edição, Método 2130B

Fonte: Autor (2021).

Observa-se na Tabela 3, que o valor obtido para Cor aparente foi de 100,04 uH e conforme estabelecido na Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021) esse valor está cerca de sete vezes acima do máximo permitido pela legislação supracitada. Conforme Libânio (2017), quando se trata de lagoas urbanas, geralmente estas não possuem mata ciliar, deixando o manancial exposto a águas oriundas de drenagens urbanas. Este é um dos principais fatores responsáveis pela poluição das águas de mananciais urbanos, portanto, possivelmente esse valor acima do máximo estabelecido para Cor aparente, indica que a água da lagoa esteja recebendo água de drenagem urbana ou até mesmo, água proveniente de esgotos domésticos que são direcionados indevidamente para as galerias pluviais.

O resultado para o parâmetro de Turbidez da água bruta apresentado na Tabela 3, foi de 9,09 UNT, apresentando-se em desconformidade ao valor estabelecido na Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), seu valor está cerca de 82% acima do máximo permitido pela legislação. Como as amostras de água coletadas do

manancial de estudo foram coletadas no período chuvoso, possivelmente esta lagoa recebeu o carreamento de partículas sólidas, como argila, silte e matéria orgânica, contribuindo desta forma para esse alto valor da Turbidez. Conforme Santos (2016), águas que apresentam turbidez elevada, demandam de uma maior aplicação de coagulantes nos processos de tratamento, também dificultam a inativação dos micro-organismos na etapa de desinfecção, além de afetar a penetração da luz na água, ocasionando a redução da fotossíntese dos organismos vivos, como algas e fitoplâncton, isso pode levar a uma depleção do oxigênio dissolvido comprometendo a qualidade deste manancial e a diversidade do ecossistema aquático.

Vale ressaltar ainda que, o metal ferro apresentou-se na água bruta, com concentração de 0,25 mg/L muito próximo ao limite máximo preconizado pela Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), isso pode ser provocado pelo lançamento de despejos domésticos (DAVIS, 2017).

Os demais parâmetros obtiveram resultados abaixo dos valores estabelecidos na legislação, dessa forma, estão em conformidades com os padrões de potabilidade da Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

4.2.2 Resultados dos exames microbiológicos para as amostras de água bruta

Os resultados dos exames microbiológicos para água bruta, estão apresentados na Tabela 4, juntamente com os valores máximos estabelecidos pela legislação, que estabelece o padrão de potabilidade das águas de abastecimento para o consumo humano no Brasil, Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

Tabela 4 - Resultados dos exames microbiológicos realizados nas amostras da água bruta, em destaque, os resultados que se apresentaram em desconformidade ao estabelecido pela Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

Parâmetros	Resultados	VMP-PORT. GM/MS N°888	Unidade	Método de determinação
Bactérias Heterotróficas	1.500	até 500	UFC/mL	SMWW, 23ª Ed., Método 9215 C - Spread Plate
Coliformes Totais	presença	ausência	NMP/100mL	SMWW, 23ª Ed., Método 9223-B Enzyme Substrate Test
Escherichia coli	presença	ausência	NMP/100mL	SMWW, 23ª Ed., Método 9223-B Enzyme Substrate Test

Legenda: UFC/mL - Unidade Formadora de Colônia por Mililitro, NMP/100mL - Número Mais Provável por 100 mL, VMP - Valor Máximo Permitido.

Fonte: Autor (2021).

Para o parâmetro de *Escherichia coli*, o resultado afirma que há presença na água

bruta examinada. Desta forma, provavelmente este manancial está recebendo despejos de esgotamento sanitário (DAVIS, 2017). Indicando assim a desconformidade com a Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021). Conforme Silva (2017), a ingestão de água contaminada com *Escherichia coli* pode causar sérios danos para a saúde humana, como infecções, cólicas abdominais, náuseas, diarreias, vômitos.

Quanto aos resultados obtidos para bactérias do grupo Coliformes Totais, que se caracteriza por ser um indicador de contaminação microbiológica, que podem representar patógenos responsáveis por transmitirem doenças de veiculação hídrica (SILVA et al. 2011), apresentou-se presente em 100mL examinados. Apresentando-se em desconformidade com a Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021). Devido a estes resultados, possivelmente a água de estudo deve estar recebendo água proveniente de esgotos domésticos (DAVIS, 2017).

4.3 Resultados para experimentos de tratamento da água de estudo obtidos em bancada

Nesta etapa, foram realizados experimentos com vazões de água bruta de 0,4 L/min e 0,8 L/min, alimentando o fotorreator. As coletas de amostras foram realizadas a cada 3 min e finalizando o experimento após 18 minutos do início. As análises físico-químicas, foram realizadas utilizando-se equipamentos de bancada, assim que foram feitas as coletas das amostras. Após estes experimentos, foi feita a escolha da melhor eficiência de remoção obtida, observando-se o parâmetro turbidez para todas amostras analisadas, para os dois experimentos. Segundo Raposo, Barros e Magalhães Júnior (2009), a Turbidez é um dos principais parâmetros da qualidade da água, pois tem a capacidade de comprovar mudanças na dinâmica da água da bacia e dos sedimentos causadas pela erosão acelerada. Portanto, a turbidez é muito útil na análise ambiental de bacias hidrográficas, pois o uso e a cobertura do solo podem ser correlacionados com este parâmetro para detectar danos ao curso de água relacionados às atividades humanas.

4.3.1 Resultados do tratamento da água de estudo obtidos em bancada, com vazão de 0,4 L/min

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros pH, Teor de sólidos dissolvidos (TDS), Turbidez e tempo em que a coleta foi realizada, após o início dos experimentos. O tempo de 3 min foi escolhido, por representar proximidade entre os valores a

serem obtidos posteriormente e os já obtidos, dando assim melhor possibilidade de se identificar possíveis alterações mesmos que mínimas.

Tabela 5 - Resultados de bancada para experimento de vazão 0,4 L/min

Tempo (min)	pH	TDS (mg/L)	Turbidez (UNT)	
			Resultado	Remoção (%)
0	8,01	336	9,09	0%
3	6,32	456	4,98	45%
6	9,03	441	5,38	41%
9	9,30	448	5,75	37%
12	9,36	455	6,87	24%
15	9,32	450	7,18	21%
18	9,20	408	7,24	20%

Fonte: Autor (2021).

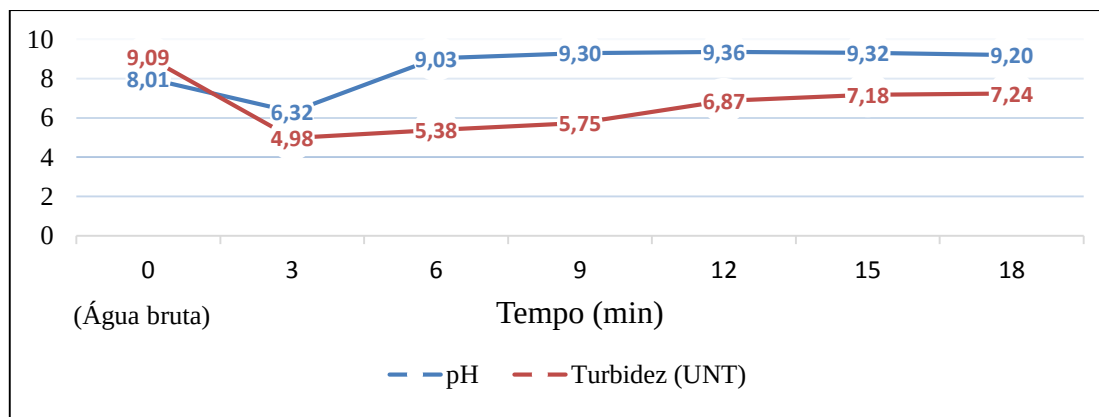
Conforme apresentado na Tabela 5, observa-se que o melhor valor obtido para remoção de Turbidez foi de 4,98 UNT para a água tratada com o fotorreator, após 3 min de funcionamento. Partindo-se de um valor de Turbidez da água bruta de 9,09 UNT, percebe-se que houve uma redução de 45%. Segundo Bilotta (2000), água com elevada Turbidez, pode dificultar a desinfecção por radiação UV-C, pois as partículas em suspensão agem como um anteparo para a radiação, evitando que atinja diretamente os microrganismos.

Observa-se que para o parâmetro pH, houve uma considerável alteração, onde inicialmente o pH estava na escala de pH alcalino com valor de 8,01 e após os 3 minutos de experimento, chegou a um pH ácido com valor de 6,32. Para os tempos de 6, 9, 12, 15 e 18 minutos observou-se valores de pH um pouco acima de 9, não havendo alterações significativas nesse último intervalo. A Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021) estabelece que para águas de abastecimento público o pH deve estar com valor entre 6,0 e 9,5. Segundo Silva (2018) água apresentando-se com valores de pH abaixo de 7, com acidez elevada pode indicar contaminações e água com solubilização de sais em excesso pode resultar em uma água imprópria para o consumo.

Para o parâmetro TDS, que verifica a concentração de minerais dissolvidos na água (ALMEIDA; SOUZA, 2019). Observa-se que houve um aumento nos primeiros 3 min de experimento, partindo inicialmente de um valor 336 mg/L e chegando a um valor de 456 mg/L, no entanto, após essa variação, manteve-se praticamente constante até o final do experimento, apresentando-se em conformidade com a Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021) que estabelece uma concentração menor que 1000 mg/L.

Na Figura 25, observa-se o comportamento dos resultados para o parâmetro de pH e Turbidez ao longo do tempo dos 18 min de experimento com vazão de 0,4 L/min. Os valores apresentaram-se estabilizados a partir dos 6 min de operação do fotorreator. A partir desses resultados, constata-se que não há possibilidades de se aplicar maiores tempos de experimentação.

Figura 25 - Valores obtidos no experimento de bancada para o pH e a Turbidez na vazão de 0,4 L/min



Fonte: Autor (2021).

Para este experimento em que o fotorreator operou com vazão de 0,4 L/min, o melhor valor obtido para o parâmetro turbidez foi 4,98 UNT, que corresponde a um tempo de detenção hidráulica de 1 min e 43 s. Sabendo-se que a Intensidade de irradiação da lâmpada UV-C de 75W é de 0,23 mW/cm², assim, nestas condições operacionais, e utilizando-se da Equação 6, obtém-se a dose aplicada de radiação proveniente da fonte ultravioleta, lâmpada UV-C.

$$D = I \cdot t$$

$$D = 0,23 \times 104$$

$$D = 23,92 \text{ mWs/cm}^2$$

As melhores condições operacionais estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Melhores resultados para experimento com vazão de 0,4 L/min

Vazão (L/min)	Tempo (min)	TDH (s)	Intensidade (mW/cm ²)	Turbidez (UNT)	Dose (mWs/cm ²)
0,4	3	104	0,23	4,98	23,92

Fonte: Autor (2021).

4.3.2 Resultados do tratamento da água de estudo obtidos em bancada, com vazão de 0,8 L/min

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos para os parâmetros pH, TDS, Turbidez e tempo em que a coleta foi realizada, após o início dos experimentos.

Conforme apresentado na Tabela 7, observa-se que o melhor valor obtido para Turbidez foi de 8,83 UNT na água tratada com o fotorreator. Partindo-se de um valor de Turbidez da água bruta de 9,09 UNT, percebe-se que houve uma redução de apenas de 3%.

Observa-se que para o parâmetro pH, não houve alterações significativas, apenas um leve aumento após os 3 min de experimento, chegando a um valor de pH 9,80 e mantendo-se praticamente constante no decorrer de todo o experimento, na classe de pH alcalino.

Para o parâmetro TDS, observa-se que houve um aumento nos primeiros 3 minutos de experimento, partindo inicialmente de um valor 336 mg/L e chegando a um valor de 454 mg/L, no entanto, após essa variação, manteve-se praticamente constante até o final do experimento.

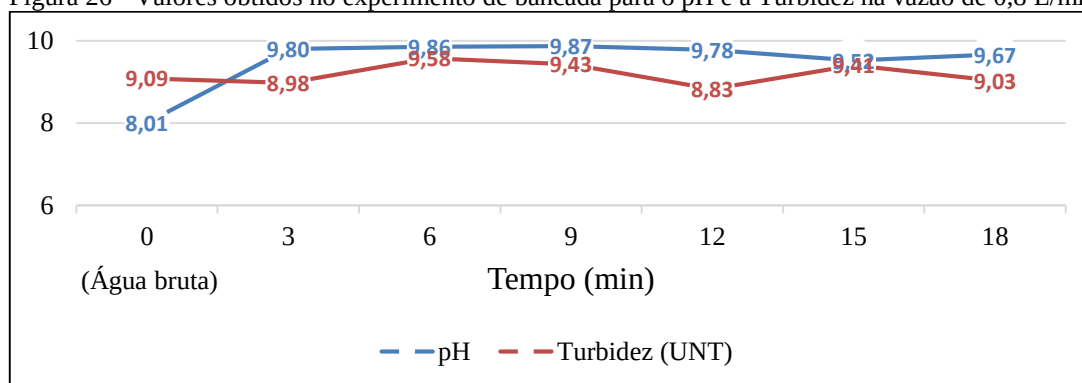
Tabela 7 - Resultados de bancada para experimento de vazão 0,8L/min

Tempo (min)	pH	TDS (mg/L)	Turbidez (UNT)	
			Resultado	Remoção (%)
0	8,01	336	9,09	0%
3	9,80	454	8,98	1%
6	9,86	424	9,58	0%
9	9,87	454	9,43	0%
12	9,78	457	8,83	3%
15	9,52	436	9,41	0%
18	9,67	418	9,03	1%

Fonte: Autor (2021).

Na Figura 26, observa-se o comportamento dos resultados para o parâmetro de pH e Turbidez ao longo do tempo dos 18 min de experimento com vazão de 0,8 L/min. Os valores para a Turbidez apresentaram-se praticamente constante no decorrer de todo o experimento. Para o pH houve um pequeno acréscimo após os 3 min de experimento e permanecendo estabilizado a partir dos 6 min de operação do fotorreator.

Figura 26 - Valores obtidos no experimento de bancada para o pH e a Turbidez na vazão de 0,8 L/min



Fonte: Autor (2021).

Para este experimento em que o fotorreator operou com vazão de 0,8 L/min, o melhor valor obtido para o parâmetro turbidez foi 8,83 UNT, que corresponde a um tempo de detenção hidráulica de 0,86 min ou 52 s. Sabendo-se que a Intensidade de irradiação da lâmpada UV-C de 75 W é de 0,23 mW/cm², assim, nestas condições operacionais e utilizando-se da Equação 6, obtém-se a dose aplicada de radiação proveniente da fonte ultravioleta, lâmpada UV-C.

$$D = I \cdot t$$

$$D = 0,23 \times 52$$

$$D = 11,96 \text{ mWs/cm}^2$$

As melhores condições operacionais estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Melhores resultados obtidos entre os experimentos realizados.

Vazão (L/min)	Tempo (min)	TDH (s)	Intensidade (mW/cm ²)	Turbidez (UNT)	Dose (mWs/cm ²)
0,8	12	52	0,23	8,83	11,96

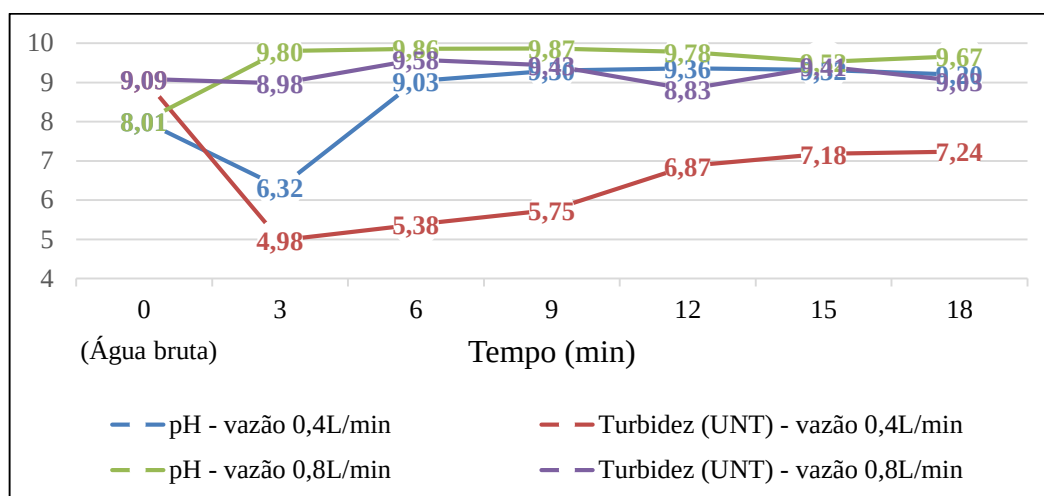
Fonte: Autor (2021).

4.4 Comparação entre os resultados dos experimentos de bancada (0,4 L/min e 0,8 L/min)

Na Figura 27, estão apresentados os parâmetros pH e Turbidez para os experimentos realizados com as vazões 0,4 L/min e 0,8 L/min.

Observa-se na Figura 27, que o resultado de turbidez com o fotorreator operando com vazão de 0,4L/min, manteve-se inferior para todas as amostras, quando comparadas com os resultados do experimento com vazão de 0,8 L/min, em seus respectivos tempos de experimento.

Figura 27 - Comparativo de pH e Turbidez para vazões de 0,4 L/min e 0,8 L/min

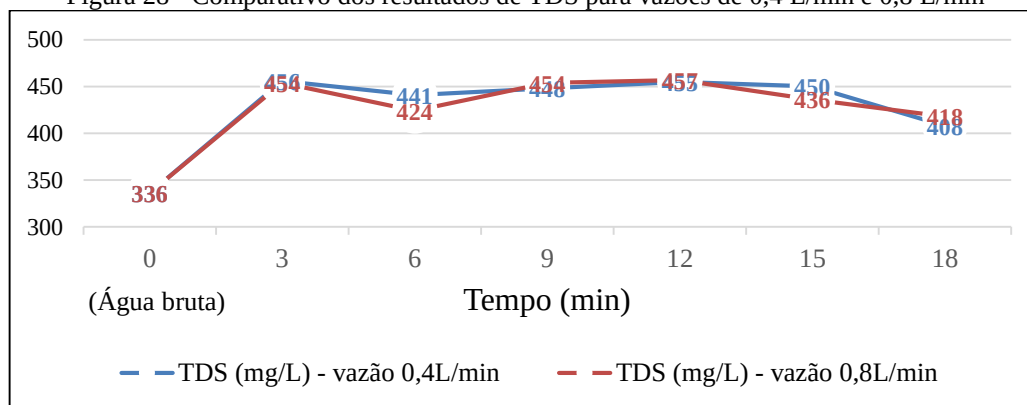


Fonte: Autor (2021).

Ao analisar o parâmetro pH, observa-se que para o tempo de experimento de 3 min., foi onde ocorreu a maior alteração para o parâmetro de pH em ambos os experimentos, porém, essa alteração ocorreu de forma oposta para cada experimento. Na vazão de 0,4 L/min, o pH sofreu uma redução de 21% em comparação com o pH da água bruta. Já para a vazão de 0,8 L/min, o pH sofreu um aumento de 22% em comparação com o pH da água bruta.

Na Figura 28, observa-se o comportamento dos resultados para o parâmetro TDS, dos experimentos realizados com as vazões 0,4 L/min e 0,8 L/min.

Figura 28 - Comparativo dos resultados de TDS para vazões de 0,4 L/min e 0,8 L/min



Fonte: Autor (2021).

Observa-se na Figura 28, que em ambos os experimentos, ocorreu um aumento inicial para o tempo de 3 min e após esse tempo não houve mais alterações significativas.

4.5 Resultados da água tratada para a melhor condição operacional obtida

Tomando como base no melhor resultado obtido para o parâmetro turbidez, nas experimentações de bancada anteriormente aventadas, replicou-se estas condições operacionais, tais como: vazão de 0,4 L/min, tempo de experimentação 3 min, tempo de detenção hidráulica de 1 min e 43 s, e com dose de irradiação de 23,92 mWs/cm². As amostras coletadas de água bruta e tratada mantendo-se estas condições de operação supracitadas para o funcionamento do fotorreator, foram enviadas a um laboratório de análises e exames externo para melhor aferição da eficiência alcançada.

4.5.1 Resultados Físico-químicos

Os resultados Físico-químicos para água tratada, estão apresentados na Tabela 9, juntamente com os valores máximos estabelecidos pela legislação, que estabelece o padrão de potabilidade das águas de abastecimento para o consumo humano no Brasil, conforme a Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

Tabela 9 - Resultados físico-químicos para água tratada, em destaque, os valores que se apresentaram acima do máximo estabelecido pela Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

Parâmetros	Resultados	VMP-PORT. GM/MS N°888	Unidade	Método de determinação
pH à 25°C	7,860	6,0 a 9,5	-	SMWW, 23ª Edição, Método 4500 - B - Eletrometric Method
Amônia (NH ₃)	<0,300	até 1,500	mg/L	PTE-210.36:00
Cloretos	100,281	até 250,000	mg/L	SMWW, 23ª Ed., Método 4500Cl-B Argentometric Method
Cor Aparente	100,04	até 15,00	uH	SMWW, 23ª Edição, Método 2120B
Dureza Total	157,355	até 500,000	mg/L	SMWW, 23ª Edição, Método 2340C
Estimativa de TDS	341,36	até 1.000,000	mg/L	PEDROSA E CAETANO, 2002
Ferro	0,680	até 0,300	mg/L	SMWW, 23ª Edição, Método 3500-Fe B
Nitratos	<0,100	até 10,000	mg/L NO ₃ -N	SMWW, 23ª edição, Método 4500NO ₃ - D
Nitritos	<0,050	até 1,000	mg/L NO ₂ -N	SMWW, 23ª Edição, Método 4500NO ₂ -B
Sódio	85,8	até 200,000	mg/L	SMWW, 23ª Edição, Método 3500- Na B
Sulfato	22,7	até 250,000	mg/L	SMEWW 23ª Ed. 2012 Método 4500 SO ₄ - 2 E
Turbidez	5,8	até 5,000	UNT	SMWW, 23ª Edição, Método 2130B
Cloro Residual Livre	0,00	de 0,20 a 2,0	mg/L	SMWW 23ª4500Cl- G - Chlorine Test - DPD Colorimetric Method

Fonte: Autor (2021).

Observa-se na Tabela 9, que para o parâmetro de Cor aparente o resultado obtido foi igual ao de água bruta de 100 uH, ou seja, o tratamento realizado com a aplicação da radiação UV-C não mostrou efeitos significativos para o que causa cor na água, como já era esperado, pois a radiação UV-C age na inativação dos microrganismos (LIBÂNIO, 2017).

Ainda segundo a Tabela 9, observa-se que o metal ferro apresentou na água bruta a concentração de 0,25 mg/L. Já para a água tratada nas melhores condições operacionais, obteve-se 0,68 mg/L. Segundo a Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), este valor obtido após o tratamento, encontra-se duas vezes maior que o estabelecido pela legislação supracitada, que é de 0,30 mg/L. Acredita-se que esse aumento de Ferro, tenha relação com os registros que foram utilizados para concepção do fotorreator, pois estes registros possuem partes internas em aço, provavelmente estavam oxidados, ocasionando esse aumento para o parâmetro Ferro.

Observa-se na Tabela 9, que o parâmetro de Turbidez para a água tratada, houve uma redução de 36%, resultou em 5,8 UNT, porém ainda manteve-se cerca de 16% acima do estabelecido pela Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), no qual estabelece 5 UNT, apresentando-se dessa forma em desconformidade com a legislação supracitada.

Para os resultados de água tratada, adiciona-se o parâmetro de Cloro residual livre na análise e conforme a Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021), no qual estabelece um valor mínimo de 0,2 mg/L e que não exceda a 2,0 mg/L. Porém, de acordo Paixão, Silva e Andreola (2014), esse Cloro residual livre pode reagir com matéria orgânica natural e formar os subprodutos, como Trihalometanos (THMs) e os ácidos haloacéticos (AHA), que são nocivos para a saúde.

Para o parâmetro cloro residual livre, no artigo 32 da Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021) define que é obrigatória a manutenção de, no mínimo, 0,2 mg/L de cloro residual livre ou 2 mg/L de cloro residual combinado ou de 0,2 mg/L de dióxido de cloro em toda a extensão do sistema de distribuição (reservatório e rede) e nos pontos de consumo. Observa-se que, o resultado apresentado para água tratada apresentou 0,0 mg/L. Sabendo que o cloro é um oxidante, sendo assim, teria uma ação de desinfecção que poderia prejudicar o objetivo desta pesquisa, optou-se por não adicionar nenhum oxidante durante a realização dos experimentos.

4.5.2 Resultados dos exames microbiológicos

Os resultados dos exames microbiológicos para água tratada, estão apresentados na Tabela 10, juntamente com os valores máximos e padrões estabelecidos pela legislação, que estabelece o padrão de potabilidade das águas de abastecimento para o consumo humano no Brasil, conforme a Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

Tabela 10 - Resultados exames microbiológicos para água tratada, em destaque, os resultados que se apresentaram conforme ao estabelecido pela Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

Parâmetros	Resultados	VMP-PORT. GM/MS N°888	Unidade	Método de determinação
Bactérias Heterotróficas	---	até 500	UFC/mL	SMWW, 23ª Ed., Método 9215 C - Spread Plate
Coliformes Totais	ausência	ausência	NMP/100mL	SMWW, 23ª Ed., Método 9223-B Enzyme Substrate Test
Escherichia coli	ausência	ausência	NMP/100mL	SMWW, 23ª Ed., Método 9223-B Enzyme Substrate Test

Legenda: UFC/mL - Unidade Formadora de Colônia por Mililitro, NMP/100mL - Número Mais Provável por 100 mL, VMP - Valor Máximo Permitido.

Fonte: Autor (2021).

Observa-se na Tabela 10, que não foram detectadas as unidades formadoras de colônia das bactérias heterotróficas na amostra da água tratada. Considerando que na amostra de água bruta estava com 1500 UFC/mL, o resultado mostra que houve uma eliminação total dessas bactérias e apresentando-se assim, em conformidade com a Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

Para o parâmetro de *Escherichia coli*, o resultado mostra a ausência na água tratada examinada. Como na amostra de água bruta foi constatado a presença de *Escherichia coli*, então o tratamento com a radiação UV-C, conseguiu eliminar a *Escherichia coli*. Apresentando-se assim, em conformidade com a Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

Ainda na Tabela 10, observa-se que o resultado obtido, detectou ausência para bactérias do grupo Coliformes Totais. Considerando que na amostra de água bruta foi detectado presença dessas bactérias, então o tratamento com a radiação UV-C, conseguiu eliminar as bactérias do grupo Coliformes Totais. Apresentando-se assim, em conformidade com a Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

Ao avaliar os resultados obtidos para os exames microbiológicos, pode-se afirmar

que o tratamento com radiação UV-C promoveu resultados satisfatórios, tornando a água bruta da lagoa de Messejana-CE, que estava em desconformidade com a legislação e após submeter-se ao tratamento de radiação UV-C resultou em uma água em conformidade com a Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

4.6 Avaliação dos custos de implementação do processo

Para obtenção dos custos de montagem, instalação e operação do fotorreator, foram considerados os preços dos equipamentos, insumos necessários e o custo referente ao consumo de energia, considerando o tempo de realização do experimento com o Fotorreator. Na Tabela 11, estão apresentados os insumos e equipamentos utilizados para montagem, instalação e operação do fotorreator, operado por energia elétrica, juntamente com seus respectivos custos, resultando em um custo total de R\$ 844,00.

Tabela 11 - Insumos e equipamentos utilizados para montagem, instalação e operação do fotorreator.

Materiais e Equipamentos	Quantidade	Unidade	Preço unitário	Preço total
Bombonas	2	und	R\$ 40,00	R\$ 80,00
Mangueira cristal 3/4" (m)	10	mt	R\$ 7,00	R\$ 70,00
Registros 3/4" PVC	4	und	R\$ 10,00	R\$ 40,00
Tê 3/4" PVC	2	und	R\$ 5,00	R\$ 10,00
Flange 3/4" PVC	1	und	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Torneira 1/2" PVC	1	und	R\$ 10,00	R\$ 10,00
Adaptador 3/4" x Mang PVC	4	und	R\$ 3,50	R\$ 14,00
Filtro de cartucho - Remoção 30 a 50µm	1	und	R\$ 150,00	R\$ 150,00
Lâmpada UV-C 75W	1	und	R\$ 152,00	R\$ 152,00
Reator PVC	1	und	R\$ 66,00	R\$ 66,00
Bomba hidráulica periférica	1	und	R\$ 195,00	R\$ 195,00
Mini compressor de ar	1	und	R\$ 47,00	R\$ 47,00
			Custo total	R\$ 844,00

Fonte: Autor (2021).

Na Tabela 12 estão apresentados os valores de consumo de energia do fotorreator aplicado na referida pesquisa, considerando seu tempo de funcionamento para se obter 1000 Litros de água desinfetada.

Tabela 12 – Consumo de energia referente ao Fotorreator.

Equipamentos	Potência (kW)	Potência Fotorreator (kW)	Tempo de funcionamento (h)	Volume de água tratada (m³)	Energia consumida (kWh/m³)	Valor desinfecção (R\$/m³)
Bomba hidráulica periférica	0,370	0,448	0,05	0,0012	18,66	15,86
Lâmpada UV-C 75W	0,075					
Mini compressor de ar	0,003					

Fonte: Autor (2021).

Considerando que o tempo de funcionamento do Fotorreator foi de 3 min, equivalente a 0,05 horas, realizando a desinfecção de 1,2 L de água e sabendo que o somatório das potência dos equipamentos que compõem o fotorreator é de 447,8 W, conforme apresentado na Tabela 12. Aplicando esses dados obtidos na Equação 8, é possível determinar o consumo de energia necessário para realizar a desinfecção de 1000 L de água, utilizando este Fotorreator.

$$C_{energia} = \frac{U.I.T}{V}$$

Aplicando em uma regra de três simples, é possível obter o tempo para desinfecção de 1000 L, equivalente a 1m³ de água, utilizando o sistema proposto com radiação UV-C. Onde resulta em um tempo total de 41 h e 40 min. Como a potência do reator é de 0,448 kW, o resultado para o consumo de energia será de apenas 18,66 kWh/m³.

Para obtenção do valor final, foi considerado o valor monetário do kWh praticado pela Companhia energética do Ceará, juntamente com os valores das alíquotas do PIS, CONFINS e ICMS aplicados na fatura da cidade de Fortaleza (ENEL, 2021). Durante a realização desta pesquisa, o valor do kWh foi de R\$ 0,85 para tarifa residencial normal - B1. Aplicando-se esse valor, obtém-se o custo apresentado na Tabela 12, resultando em um valor de R\$ 15,86 para desinfecção de 1000 L de água.

Este valor de R\$ 15,86/m³ é quase 5 vezes maior que o valor do m³ praticado pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará - CAGECE, para residências popular, que nesse período custava R\$ 3,18/m³ para consumo de até 10 m³ (CAGECE, 2021). Porém, o valor obtido ainda torna-se viável para aplicações de tratamento de água em residências que não possuam fornecimento de água potável, evitando dessa forma a possibilidade de contaminações e infecções pelo consumo de águas contaminadas.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nos experimentos realizados suportam as conclusões sobre a aplicabilidade da radiação ultravioleta – C (UV-C) como alternativa para desinfecção de águas urbanas com elevada concentração de microalgas, visando o consumo humano, apresentadas a seguir.

- A tecnologia apresentada pelo fotorreator (radiação ultravioleta – C associada com filtração por membrana de polipropileno), com tempo de detenção de 1 min e 43 s, empregada como alternativa de desinfecção, proporcionou a inativação total dos indicadores de contaminação microbiológica existentes na água de estudo (com presença de bactérias heterotróficas, *Escherichia coli* e Coliformes Totais). Alcançando remoção de 100%, conforme apresentaram os exames microbiológicos executados na água de estudo tratada, atendendo assim aos padrões estabelecidos pela Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).
- A água de estudo quando submetida a associação tecnológica empregada pelo fotorreator, operando com tempo de detenção hidráulica de 1 min e 43 s, apresentou acréscimo na concentração de ferro, conclui-se que essa ocorrência possa ter sido causada pela utilização de registros hidráulicos com partes internas oxidadas, o que pode ser evitado com o uso de acessórios hidráulicos que sejam inertes. Conclui-se ainda que, para todos os outros parâmetros físico-químicos analisados para a água de estudo tratada com o fotorreator, os valores se mantiveram dentro da faixa de conformidade estabelecidos pela Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).
- Para a tecnologia apresentada pelo fotorreator (radiação ultravioleta – C associada com filtração por membrana de polipropileno), configurando um sistema de desinfecção por radiação UV-C, utilizando-se de fontes UV-C/75 W e com intensidade de radiação de 0,23 mW/cm², fornecendo uma dose de radiação 23,92 mWs/cm², tratando a água de estudo com vazão de 0,4 L/min e com tempo de detenção hidráulica de 1 min e 43 s, conclui-se que tal configuração enquadra-se como uma alternativa viável de desinfecção de águas inadequadas ao consumo humano.
- A tecnologia apresentada pelo fotorreator, apresentou custo total de montagem no valor de R\$ 844,00, e na operação de tratamento da água de estudo apresentou consumo de energia equivalente a 18,66 kWh/m³ e considerando o valor monetário do Kwh praticado na cidade de Fortaleza de R\$ 0,85, resulta em um valor total de R\$ 15,86/m³. Desta forma, conclui-se

que a tecnologia se caracteriza como uma alternativa de baixo custo de investimento e operação, sendo viável e acessível no aspecto de uso doméstico.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, que possa intensificar a eficiência aqui estudada de tratamentos alternativos aplicados a águas destinadas ao consumo humano, sem a aplicação de insumos químicos, estão a seguir:

- Realizar outros experimentos utilizando o fotorreator concebido durante esta pesquisa, com vazões e tempo de detenção hidráulica diferentes das que foram analisadas neste estudo;
- Analisar a aplicação de outras fontes de energia, para possibilitar redução nos custos de operação do fotorreator UV-C;
- Incluir nesse sistema de tratamento por radiação UV-C, tecnologias mais intensiva nos parâmetros físicos-químicos da água, de modo a padronizar conforme a Portaria nº 888, do Ministério da Saúde do Brasil de 04 de maio de 2021 (BRASIL, 2021).

REFERÊNCIAS

ABDALA NETO, Eliezer Fares. **Pré e pós-tratamento por eletro-oxidação associada à fotocatalise heterogênea em uma eta por filtração direta visando a redução dos precursores dos compostos organoclorados**. 2012. 250 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

ABREU, Nathália. **Da captação à distribuição, o caminho que a água faz até nossas casas**. 2017. Disponível em: <https://autossustentavel.com/2017/03/estacao-tratamento-agua-eta.html#:~:text=Os%20filtros%20formados%20de%20cascalho,a%20remo%C3%A7%C3%A3o%20de%20microrganismos%20patog%C3%AAnicos>. Acesso em: 25 set. 2020.

ALCANTARA, Flávio José Vacari de. **Estudo comparativo de dois leitos filtrantes com porosidades distintas em sistemas de dupla filtração para tratamento de água**. 2010. 115 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010. Disponível em: <https://ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgrhs/sites/default/files/dissertacaoflaviojvalcantara.pdf>. Acesso em: 26 set. 2020.

ALMEIDA, Wadson Rodrigo Ferreira de; SOUZA, Flavio Mendes de. **Análise Físico-Química da Qualidade da Água do Rio Pardo no Município de Cândido Sales – BA**. Multidisciplinar e Psicologia, Cândido Sales, v. 13, n. 43, p. 353-378, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/online.v13i43.1534>. Acesso em: 10 maio 2021.

APHA - American Public Health Association. AWWA - American Water Works Association. WEF - Water Environmental Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23th ed. APHA/AWWA/WEF: Washington, 2017. Disponível em: <https://www.standardmethods.org/doi/book/10.2105/SMWW.2882>. Acesso em: 02 dez. 2020.

ARAÚJO, F. R. de. **Controle de Qualidade Microbiológico: Águas e Alimentos (Gelados Comestíveis)**. 2016. Monografia (Bacharelado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

BARBOSA, Alene de Oliveira. **Uso da radiação ultravioleta como técnica avançada de tratamento de água**. 2016. 53 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016. Disponível em: http://ct.ufpb.br/ccec/contents/documentos/tccs/copy_of_2016.1/uso-da-radiacao-ultravioleta-como-tecnica-avancada-de-tratamento-de-agua.pdf. Acesso em: 03 out. 2020.

BASTOS, Fernanda Pereira. **Tratamento de água de chuva através de filtração lenta e desinfecção UV**. 2007. 135 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007. Disponível em: <http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/1933/1/Dissertacao%20Fernanda%20Bastos.pdf>. Acesso em: 20 out. 2020.

BILOTTA, Patrícia. **Estudo comparativo da ação do ozônio e e radiação UV na desinfecção de esgoto sanitário**. 2000. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/33766680_Estudo_comparativo_da_acao_do_ozonio_e_radiacao_UV_da_desinfeccao_de_esgoto_sanitario. Acesso em: 15 set. 2020.

BILOTTA, Patrícia; DANIEL, Luiz Antonio. **Ozônio e Radiação UV na inativação de indicadores patogênicos em esgoto sanitário: Análise comparativa**. Minerva: Pesquisa e Tecnologia, São Paulo, v. 3, n. 2, p. 199-207, jul. 2006. Semestral. Disponível em: [http://www.fipai.org.br/Minerva%2003\(02\)%2008.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2003(02)%2008.pdf). Acesso em: 18 set. 2020.

BITTENCOURT, Cláudia; PAULA, Maria Aparecida Silva de. **Tratamento de água e efluentes: fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos**. São Paulo: Saraiva, 2014. 184 p. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536521770/pageid/0>. Acesso em: 20 set. 2020.

BODAS, Flávia Renata Lemes de; JARDIM, Maria Inês de Affonseca; ERROBIDART, Nádia Cristina Guimarães. **Proposta de material didático para contextualização histórica de fontes luminosas e tecnologias de iluminação**. 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/318755563_Proposta_de_material_didatico_para_contextualizacao_historica_de_fontes_luminosas_e_tecnologias_de_iluminacao_Proposal_of_didactic_material_for_historical_contextualization_of_light_sources_and_lighti. Acesso em: 08 nov. 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Plano de Segurança da Água: garantindo a qualidade e promovendo a saúde**. Brasília: Ms, 2012. 60 p. (B). Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/plano_seguranca_agua_qualidade_sus.pdf. Acesso em: 01 nov. 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS / Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde**. – Brasília: Funasa, 2014. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manualcont_quali_agua_tecnicos_trab_emetas.pdf

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. **Portaria de Consolidação Nº 5 de 28/09/2017: Anexo XX do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (origem: prt MS/GM 2914/2011)**. Disponível em: https://www.normasbrasil.com.br/norma/portaria-de-consolidacao-5-2017_356387.html. Acesso em: 23 set. 2020.

BRASIL. Ministério do desenvolvimento regional. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**. Brasília: SNS/MDR, 2019a. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-dos-servicos-de-agua-e-esgotos-2018>. Acesso em: 23 set. 2020.

BRASIL. Ministério do desenvolvimento regional. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília: Ana, 2019b. 110 p. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/static/media/conjuntura-completo.bb39ac07.pdf>. Acesso em: 04 out. 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de Maio de 2021**. 85. ed. Brasília. Diário Oficial da União, 7 maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 13 maio 2021.

CAGECE (Ceará). Companhia de Água e Esgoto. **Estrutura Tarifária**. 2021. Disponível em: <https://www.cagece.com.br/produtos-e-servicos/precos-e-prazos/estrutura-tarifaria/>. Acesso em: 05 jun. 2021.

CAMPOS, Danilo Aparecido Gatto; FRANCO, Janaina de Melo; ABREU FILHO, Benício Alves de; BERGAMASCO, Rosângela; YAMAGUCHI, Natália Ueda. **Avaliação da qualidade da água destinada ao consumo humano em instituição de ensino**. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, [S.L.], v. 15, n. 1, p. 289-298, 2017. Universidade Vale do Rio Verde (UninCor). <http://dx.doi.org/10.5892/ruvrd.v15i1.3340>.

CAZÚ, Danilo Cesar. **Tratamento de água por sistema sodis com utilização de Moringa oleifera**. 2019. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Campus Londrina, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019. Disponível em: http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16148/1/LD_COEAM_2019_2_04.pdf. Acesso em: 08 dez. 2020.

DANIEL, Luiz Antonio; BRANDÃO, Cristiana Celia Silva; GUIMARÃES, José Roberto; LIBÂNIO, Marcelo; LUCA, Sérgio João de. **Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável**. São Carlos, SP: Rimas Artes e Textos, 2001. 149 p. Disponível em: <https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/LuizDaniel.pdf>. Acesso em: 13 out. 2020.

DAVIS, Mackenzie. **Tratamento de águas para abastecimento e residuárias: princípios e práticas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. 778 p. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155633/cfi/6/84!/4/10@0:60.9>. Acesso em: 15 maio 2021.

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

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

ENEL. **Taxas, Tarifas e Impostos**. 2021. Disponível em: https://www.enel.com.br/pt-ceara/Tarifas_Enel.html. Acesso em: 02 abr. 2021.

FOLLMER, Darles Luan Schneider; BISOGNIN, Ramiro Pereira; SOUZA, Eduardo Lorensi de; VASCONCELOS, Márlon de Castro; GUERRA, Divanilde; SILVA, Danni Maisa da. **Construção e eficiência de um fotorreator de radiação ultravioleta de baixo custo para desinfecção de água.** Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental, Florianópolis, v. 8, n. 4, p. 165-181, dez. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v8e42019165-181>. Acesso em: 10 out. 2020.

FURTADO, Marcelo. **Desinfecção - Alternativas ao cloro melhoram qualidade da água, com segurança**, 2011. Disponível em: <http://www.quimica.com.br/desinfeccao-alternativas-ao-cloro-melhoram-qualidade-da-agua-com-seguranca/>. Acesso em: 15 set. 2020.

GOOGLE EARTH, Localização através de satélite do Estado do Ceará, 2020

KOBYA M.; HIZ H., SENTURK E.; AYDINER C.; DEMIRBAS E. Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. **Desalination**, v.190, p. 201– 211, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/journal/desalination/vol/190>. Acesso em: 01 dez. 2020.

KOMULAINEN, H. **Experimental cancer studies of chlorinated by-products.** Toxicology, v. 198, n. 1-3, p. 239-248, 2004. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15138047/>. Acesso em: 10 out. 2020.

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

MEYER, Sheila T. **O uso de cloro na desinfecção de águas, a formação de trihalometanos e os riscos potenciais à saúde pública.** Cad. Saúde Públ., Rio de Janeiro, v. 10, n. 1, p. 99-110, jan./mar. 1994. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/csp/v10n1/v10n1a11.pdf>. Acesso em: 05 out. 2020.

MONDARDO, Renata Iza. **Influência da pré-oxidação na tratabilidade das águas via filtração direta descendente em manancial com elevadas concentrações de microalgas e cianobactérias.** 2004. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/87242/204387.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 21 set. 2020.

MOREIRA, Alex Ferreira; SANTOS, Sérgio Ricardo Bezerra dos; COSTA JUNIOR, Ademar Gonçalves da. **Construção e Caracterização de um Fotômetro Destinado ao Uso de Aulas Experimentais de Química sobre a Lei de Beer-Lambert.** Holos, [S.L.], v. 2, p. 142-151, 20 abr. 2016. Instituto Federal de Educacao, Ciencia e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN). <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2016.4016>. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4815/481554865013.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2021.

NAKAGAWA, Maria Ester da Silva O.; SILVA, Joelma Mota Santos; ARNESEN, Allan Saddi. **Avaliação de oxidantes alternativos ao cloro para oxidação da água bruta de etas visando a redução da formação de trihalometanos.** 2017. Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2019/06/I-218.pdf>. Acesso em: 24 set. 2020.

NATURALTEC (Jabaquara - SP). **Reatores Físico – Químicos (Coagulação)**. [20--]. Il. Disponível em: <https://www.naturaltec.com.br/coagulacao/>. Acesso em: 04 out. 2020.

ORTIZ, Giovanna. **Tratamento de água para abastecimento**. 2013. Il. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/GiovannaOrtiz/taa-7>. Acesso em: 05 out. 2020.

PAULA, H F; ALVES, E G; MATEUS, A L. **Quântica para iniciantes: investigações e projetos**. Belo Horizonte. Editora UFMG, 2011.

PAIXÃO, Rebecca Manesco; SILVA, Luiz Henrique Biscaia Ribeiro da; ANDREOLA, Ricardo. **A cloração e a formação de trihalometanos**. Cesumar, Maringá (PR), v. 16, n. 2, p. 191-198, nov. 2014. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/iccesumar/article/download/3649/2414/>. Acesso em: 05 maio 2021.

PATTERSON, Edward I; PRINCE, Tessa; ANDERSON, Enyia R; CASAS-SANCHEZ, Aitor; SMITH, Shirley L; CANSADO-UTRILLA, Cintia; SOLOMON, Tom; GRIFFITHS, Michael J; ACOSTA-SERRANO, Álvaro; TURTLE, Lance. **Methods of Inactivation of SARS-CoV-2 for Downstream Biological Assays**. The Journal Of Infectious Diseases, [S.L.], v. 222, n. 9, p. 1462-1467, 15 ago. 2020. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/infdis/jiaa507>. Disponível em: <https://academic.oup.com/jid/article/222/9/1462/5892951#>. Acesso em: 10 nov. 2020.

RAPOSO, Aline Almeida; BARROS, Luiz Fernando de Paula; MAGALHÃES JÚNIOR, Antônio Pereira. **O parâmetro de turbidez das águas como indicador de impactos humanos na dinâmica fluvial da bacia do Rio Maracujá – Quadrilátero Ferrífero/MG**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. 13, 2009, Viçosa. Disponível em: http://www.geomorfologia.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/trabalhos_completos/eixo3/007.pdf >. Acesso em 03 maio 2021.

RICHARDSON, S., THRUSTON, A., COLLETTE, T. **Identification of new drinking water disinfection by-products from ozone, chlorine dioxide, chloramine and chlorine**. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 123, p. 95-102, 2000. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1005265509813>. Acesso em: 07 out. 2020.

RICHTER, Carlos A. **ÁGUA: Métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009. Disponível em: http://plataforma.redesan.ufrgs.br/biblioteca/pdf_bib.php?COD_ARQUIVO=18072. Acesso em: 24 set. 2020.

RIZZO, L. *et al.* **Disinfection of urban wastewater by solar driven and UV lamp – TiO₂ photocatalysis: Effect on a multidrug resistant Escherichia coli strain**. *Water Research*, v. 53, n. Supplement C, p. 145-152, 2014/04/15/ 2014. ISSN 0043-1354. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135414000529>. Acesso em: 20 set. 2020.

SANTOS, Daniel Costa dos. **Saneamento para Gestão Integrada das Águas Urbanas**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595154544/cfi/6/6!/4/2/14/8@0:100>. Acesso em: 04 mar. 2021.

SILVA, Lidiane Bittencourt da. **Avaliação dos parâmetros da qualidade de água produzida na estação de tratamento de água oeste**. 2017. 85 f. TCC (Graduação) - Curso de Química, Química Analítica e Físico-Química, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017. Disponível em:

http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/29769/1/2017_tcc_lbsilva.pdf. Acesso em: 18 set. 2020.

SILVA, Douglas Bambirra da. **Ozonioterapia na desinfecção de águas pluviais**. 2018. 47 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Microbiologia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/ICBB-BDASJV>. Acesso em: 10 out. 2020.

SILVA, N. I. FONTES, L. O. TAVELLA, L. B. OLIVEIRA, J. B. OLIVEIRA, A. C. **Qualidade da água na irrigação**. ACSA. Agropecuária Científica no Semiárido. Vol. 07. Nº 03. 2011.

SILVA, Uyara Nunes de Medeiros. **A radiação uvc como alternativa no tratamento de água**. 2018. 73 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Mestrado em Sistemas Agroindustriais, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, Universidade Federal de Campina Grande, Pombal – Pb, 2018. Disponível em:

<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3086>. Acesso em: 04 maio 2021.

SOUSA FILHO, José Waldir de. **Inovações tecnológicas para o tratamento de água para consumo humano**. 2019. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, 2019. Disponível em:

<http://bdtd.ufmt.edu.br/bitstream/tede/854/5/Tese%20Jose%20W%20Sousa%20Filho.pdf>. Acesso em: 26 set. 2020.

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

TINÔCO, Juliana Delgado. **Desinfecção por radiação ultravioleta: estudo do desempenho do processo e avaliação econômica**. 2011. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

doi:10.11606/T.18.2012.tde-04052012-093819. Acesso em: 2020-10-23.

TOLEDO, Mettler (Barueri). **Floculação**. 2020. Disponível em:

https://www.mt.com/br/pt/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ParticleProcessing/Formulation_Flocculation.html#publications. Acesso em: 25 set. 2020.

TOP LÂMPADAS (Curitiba). Empresa. **Lâmpada Germicida UV-C 75W T5/G5 Philips**. 2020. Disponível em: <https://www.toplampadas.com/lampada-germicida-75w-T5-G5-Philips>. Acesso em: 6 dez. 2020.

TORTORA, G. J. et al. **Microbiologia**. 10.ed. Porto Alegre: Artmed, 2012. 827p. Disponível em: https://www.academia.edu/38593260/Tortora_microbiologia. Acesso: 03 maio 2021

TRATA BRASIL. **Venha conhecer as etapas para o tratamento de água**. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br>. Acesso em: 22 set. 2020.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; HESPANHOL, Ivanildo; NETTO, Oscar de Moraes Cordeiro. **Gestão da Água no Brasil**. 2001. Disponível em: http://r1.ufrj.br/lmbh/pdf/Outras%20publicacoes/LMBH_gestao_da_agua_no_Brasil.pdf. Acesso em: 20 set. 2020.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO. **Separação de misturas e simulação de tratamento de água**. [20--]. il. Disponível em: <http://flexquest.ufrpe.br/projeto/7155/caso/7161/minicaso/7163>. Acesso em: 10 out. 2020.

VASCONCELOS JUNIOR, Edmilson M. de. **Aplicação de peróxido de hidrogênio em substituição ao cloro gasoso na etapa de pré oxidação no processo de tratamento de águas de abastecimento como alternativa para a redução de custo**. 2019. Disponível em: <https://www.saneamentobasico.com.br>. Acesso em: 24 set. 2020.

VELOSA, Adriana Correia de. **Avanços tecnológicos no tratamento de águas de mananciais**. Holos Environment, [S.L.], v. 15, n. 2, p. 194-210, 12 nov. 2015. Lepidus Tecnologia. <http://dx.doi.org/10.14295/holos.v15i2.9629>. Disponível em: <https://www.cea-unesp.org.br/holos/article/view/9629>. Acesso em: 05 out. 2020.

WHITE, Daniel M.; GARLAND, D. Sarah; NARR, Jasprit; WOOLARD, Craig R. **Natural organic matter and DBP formation potencial in Alaskan water supplies**. Water Research, v. 37, n. 4, p. 939-947, 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135402004256>. Acesso em: 09 out. 2020.

ZARPELON, A.; RODRIGUES, E. M. **Os trihalometanos na água de consumo humano**. Sanare Rev. Tec. Sanepar, São Paulo, n. 17, p.20-30, jan./jun. 2002. Disponível em: <http://www.sanepar.com.br/sanepar/sanare/v17/trihalometanos.htm>. Acesso em: 03 out. 2020.