

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS FREDERICO WESTPHALEN
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Daniel Pezzini Conte

DESINFECÇÃO DE ÁGUA SUPERFICIAL POR REATOR UV/OZÔNIO

Frederico Westphalen, RS

2023

Daniel Pezzini Conte

DESINFECÇÃO DE ÁGUA SUPERFICIAL POR REATOR UV/OZÔNIO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), *Campus* Frederico Westphalen, com requisito parcial para obtenção do **grau de Engenheiro Ambiental e Sanitarista**.

Orientador: Prof. Dr. Raphael Corrêa Medeiros

Frederico Westphalen, RS

2023

Daniel Pezzini Conte

DESINFECÇÃO DE ÁGUA SUPERFICIAL POR REATOR UV/OZÔNIO

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), *Campus Frederico Westphalen*, como requisito parcial do título de **Engenheiro Ambiental e Sanitarista**.

Aprovado em 04 de dezembro de 2023.

Raphael Corrêa Medeiros (UFSM)
Orientador

Marcus Bruno Soares (UFSM)

Patrícia Rodrigues Fortes (UFSM)

Frederico Westphalen, RS

2023.

RESUMO

DISINFECTION OF SURFACE WATER BY UV/OZONE REACTOR

AUTOR: Daniel Pezzini Conte

ORIENTADOR: Prof^a. Dr^a. Raphael Corrêa Medeiros

A deterioração da qualidade da água de cursos hídricos superficiais e a busca pela universalização do saneamento básico, em especial, o acesso à água potável, fazem com que novas tecnologias de tratamento sejam desenvolvidas. Processos Oxidativos Avançados são tecnologias que atuam na formação de radicais livres, e, na desinfecção, ajudam a promover a inativação dos microrganismos patogênicos presentes na água. O presente estudo utilizou um reator em escala de bancada de um sistema ultravioleta combinado com Ozônio (UV/O₃), para verificação da eficiência da desinfecção conjugada do processo oxidativo avançado. A eficiência do sistema foi verificada pela inativação de coliformes totais, *Escherichia coli* e esporos de bactérias aeróbias (EBAs), em conjunto, analisou-se parâmetros físico-químicos importantes no processo. Valores satisfatórios de inativação microbiológicas foram obtidos, alcançando logs máximos de remoção de 4 para *E. coli*, 1,85 para Coliformes Totais e de 1,42 para esporos de bactérias anaeróbias, entretanto, comparado a literatura, o sistema não se mostrou tão eficiente. O sistema UV/O₃ é um sistema altamente dependente de fatores ambientais, bem como, parâmetros físico-químicos da água a ser tratada, valores altos de turbidez, e o pH próximo do neutro provavelmente influenciaram negativamente o sistema de desinfecção.

Palavras-chave: Tratamento de água; Processos Oxidativos Avançados; Desinfecção; inativação microbiana.

ABSTRACT

AUTHOR: Daniel Pezzini Conte
ADVISOR: Prof^a. Dr^a. Raphael Corrêa Medeiros

The deterioration of water quality in surface water courses and the pursuit of universal basic sanitation, particularly access to potable water, lead to the development of new treatment technologies. Advanced Oxidative Processes are technologies that act in the formation of free radicals and, in disinfection, help promote the deactivation of pathogenic microorganisms present in water. The present study utilized a bench-scale reactor of a combined Ultraviolet and Ozone system (UV/O₃) to assess the efficiency of the combined disinfection of the advanced oxidative process. The system's efficiency was evaluated through the inactivation of total coliforms, *Escherichia coli*, and aerobic bacteria spores (EBAs), along with an analysis of important physicochemical parameters in the process. Satisfactory microbiological inactivation values were achieved, reaching maximum removal logs of 4 for *E. coli*, 1.85 for Total Coliforms, and 1.42 for anaerobic bacteria spores. However, compared to the literature, the UV/O₃ system did not prove as efficient. The UV/O₃ system is highly dependent on environmental factors, as well as physicochemical parameters of the water to be treated. High turbidity values and a pH close to neutral likely negatively influenced the disinfection system.

Key words: Water treatment; Advanced Oxidative Processes; Disinfection; microbial inactivation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Concepção clássica de estações de tratamento de água (ETAS) convencionais.....	13
Figura 02 – Produtos químicos utilizados para a desinfecção.....	14
Figura 03 – Mecanismos de decomposição direta e indireta do ozônio em meio aquoso.....	17
Figura 04 – Localização da região da luz ultravioleta no espectro eletromagnético.....	18
Figura 05 – Curva da ação germicida da radiação UV.....	19
Figura 06 – Dependência do comprimento de onda na absorção do Oxigênio.....	21
Figura 07 – Localização do ponto de coleta de água para ensaios de desinfecção.....	25
Figura 08 – Reator UV/O ₃ utilizado.....	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Equipamentos analíticos utilizados para análises físico-químicas.....	29
Tabela 02 – Dosagens de O ₃ e de UV aplicadas a cada amostra.....	30
Tabela 03 - Resultados das análises físico-químicas (30/06/2023).....	31
Tabela 04 - Resultados das análises físico-químicas (08/07/2023).....	31
Tabela 05 - Resultados das análises físico-químicas (14/07/2023).....	31
Tabela 06 - Resultados das análises microbiológicas (30/06/2023).....	33
Tabela 07 - Resultados das análises microbiológicas (08/07/2023).....	33
Tabela 08 - Resultados das análises microbiológicas (14/07/2023).....	34
Tabela 09 – Inativação microbiana (Coliformes Totais) das amostras.....	34
Tabela 10 – Inativação microbiana (<i>Escherichia Coli</i>) das amostras.....	35
Tabela 11 – Inativação microbiana (<i>Esporos de Bacterias Aeróbias - EBAs</i>) das amostras.....	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

O₃ – Ozônio;

CO₂ – Dióxido de carbono;

UV – Ultravioleta;

H₂O₂ – Peróxido de Hidrogênio;

pH – Potencial Hidrogeniônico;

OH – Hidroxila;

USGS - Agência de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos;

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente;

PCBs - Poluentes Orgânicos Resistentes;

POAs – Processos Oxidativos Avançados;

ETAs – Estações de Tratamento de Água;

TAM – Trihalometanos,

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVOS	11
1.1.1 Objetivo Geral	11
1.1.2 Objetivos Específicos	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS	15
2.1.1 Ozônio	16
2.1.2 Luz ultravioleta (UV)	18
2.1.3 O₃/UV	19
2.2 TECNOLOGIAS DE PONTO DE USO	21
2.3 COLIFORMES TOTAIS	22
2.4 ESPOROS DE BACTÉRIAS AERÓBIAS	23
3. METODOLOGIA	24
3.1 ÁGUA DE ESTUDO	24
3.2 REATOR UV/O ₃	24
3.2.1 DOSAGEM UV	26
3.2.2 DOSAGEM OZÔNIO	26
3.3 EFICIÊNCIA DE DESINFECÇÃO	27
3.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS	28
3.5 ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5. CONCLUSÃO	38
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas a sociedade tem adquirido uma conscientização crescente a respeito dos problemas ambientais e de seus efeitos para a qualidade de vida desta e das futuras gerações. O modelo econômico atual e o crescimento populacional expressivos alteram ciclos naturais e geram poluentes fazendo com que problemas ambientais, relacionados ou não à atividade antrópica, se tornem cada vez mais críticos e frequentes, afetando diretamente a qualidade da água, do ar e do solo (MAHMOUD; FREIRE, 2006; KUNZ; PERALTA-ZAMORA, 2002; TEIXEIRA; JARDIM, 2004).

Desde 1990, a Agência de Pesquisa Geológica dos Estados Unidos (USGS, em inglês), realiza pesquisas sobre a chegada de poluentes industriais e subprodutos humanos em cursos de água no país, além de constatar que diferentes contaminantes foram detectados no abastecimento de água potável. Poluentes emergentes, como denomina a Agência, é definido como “uma substância química, de ocorrência natural ou antrópica, ou qualquer microrganismo que não é normalmente controlado no ambiente, mas que tem potencial para entrar no ambiente e causar efeitos ecológicos adversos e (ou) sobre a saúde humana, sendo estes efeitos conhecidos ou suspeitos” (USGS, 2012).

Todas as águas naturais abrigam comunidades de microrganismos, como bactérias, fungos, protozoários e algas, dos quais, alguns são reconhecidos por sua capacidade de disseminar doenças. (HELLER; PÁDUA, 2006).

Sendo assim, água absolutamente pura não existe na natureza, e para o consumo humano é necessário que ela seja potável, isto é, segura (livre de contaminantes orgânicos e inorgânicos e de bactérias patogênicas), atraente de aspecto e de sabor agradável para ser bebida, adequada para finalidades domésticas e para a maior parte das atividades industriais (RICHTER, C. A., 2009). Para que isso ocorra, qualquer água de abastecimento deve passar obrigatoriamente pelo processo de desinfecção (BRASIL, 2021).

Desde o início do século XX, a cloração tem sido bastante utilizada como controle bacteriológico no tratamento de água convencional, porém, em 1974, estudos realizados nos Estados Unidos e na Europa constataram que o cloro, em reação com material orgânico na água gerava produtos químicos sintéticos, se tornando necessário um balanço entre a desinfecção de água e a geração de subprodutos (HOWE, et al., 2016). Desde então, a escolha de um sistema de desinfecção adequado não leva em consideração apenas a degradação de agentes patógenos, mas também o controle da geração de subprodutos perigosos (MEZZANOTTE, et al., 2007).

Em conjunto às descobertas acerca de subprodutos gerados na cloração e aliado à

necessidade da sociedade para a descontaminação de águas, a fim de adequação à legislações cada vez mais restritas, fez-se surgir a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias para desinfecção/purificação. Nas últimas décadas, Processos Oxidativos Avançados (POAs) têm se destacado como promissoras tecnologias no tratamento de água por serem fortes oxidantes e atuarem no controle da geração desses subprodutos. A eficácia desse sistema depende quase que inteiramente da geração de radicais hidroxila, aplicados na remoção de materiais recalcitrantes (ARAÚJO, 2014; DOMENÈCH, 2012; US EPA, 2006).

Diversos estudos apontam a eficiência de sistemas de POA composto por radiação UV combinado com ozônio(O₃), sendo assim, este estudo tem como objetivo avaliar a eficiência da desinfecção de água superficial utilizando reator UV/O₃.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência do Processo Oxidativo Avançado (POA) - UV/Ozônio - na desinfecção de água superficial, verificando aspectos físico-químicos e microbiológicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar, por meio de desinfecção por reator UV/O₃, se o processo oxidativo avançado promove alteração físico-química de cor verdadeira, pH, temperatura e absorvância em água superficial;
- Avaliar, por meio de desinfecção por reator UV/O₃, a eficiência de inativação de coliformes totais, de *Escherichia coli* e de esporos de bactérias aeróbias.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Garantir e manter um fornecimento adequado de água tem sido um dos fatores essenciais no desenvolvimento dos assentamentos humanos. As primeiras comunidades estavam preocupadas principalmente com a quantidade de água disponível. O aumento da população tem exercido uma elevada pressão sobre mananciais superficiais, contribuindo com sua contaminação com resíduos urbanos, agrícolas e industriais (HOWE et al., 2016)

De acordo com Richter (2009), inúmeras são as impurezas que se apresentam nas águas naturais, várias delas inócuas, pouco desejáveis e algumas extremamente perigosas. Entre as impurezas nocivas encontram-se vírus, bactérias, parasitas, substâncias tóxicas e, até mesmo, elementos radioativos.

Doenças de veiculação hídrica constituem um grupo de doenças acarretadas quando o agente patógeno é ingerido junto com a água, sendo a maioria dessas doenças relacionada à contaminação fecal. Esses patógenos causam doenças como febres, desintéria, hepatite A e B, cólera... A diarreia, por exemplo, causada pela ingestão de águas com contaminação fecal, constitui o principal fator de morbidade de países em desenvolvimento (HELLER; PADUA, 1997, PROSAB, 2001);

A prevalência de doenças de veiculação hídrica em determinada região geralmente é decorrente da fragilidade do sistema de saneamento básico ofertado pelo poder público, fatores relacionados à má gestão de esgotos domésticos (falta de coleta) e mal serviço no tratamento e distribuição de água potável são principais focos dessas doenças (PROSAB, 2001).

Além da falta de saneamento básico, o homem tem atuado no meio ambiente de maneira negativa por meio do lançamento de esgotos domésticos e não domésticos (despejos de indústrias e comércio) em corpos hídricos, além do exercício de atividades agropecuárias excessivas, que contribuem com a poluição da água e limitam o seu consumo para abastecimento humano (BITTENCOURT; DE PAULA, 2014).

Com o intuito de melhorar a qualidade e a oferta de água potável, são necessárias técnicas de tratamento de água adequadas e que estejam de acordo com objetivos ou padrões específicos estabelecidos pelo usuário final ou por uma comunidade. Além disso, as técnicas utilizadas precisam estar de acordo com as exigências legais (HOWE et al., 2016; BITTENCOURT; DE PAULA, 2014).

A Resolução CONAMA 357/2005 define 3 tipos de tratamento principais para água de abastecimento, o tratamento convencional, o avançado e o simplificado, descritos a seguir:

- Tratamento convencional: clarificação com utilização de coagulação e floculação,

seguida de desinfecção e correção de pH;

- Tratamento avançado: técnicas de remoção e/ou inativação de constituintes refratários aos processos convencionais de tratamento, os quais podem conferir à água características, tais como: cor, odor, sabor, atividade tóxica ou patogênica;

- Tratamento simplificado: clarificação por meio de filtração e desinfecção e correção de pH, quando necessário.

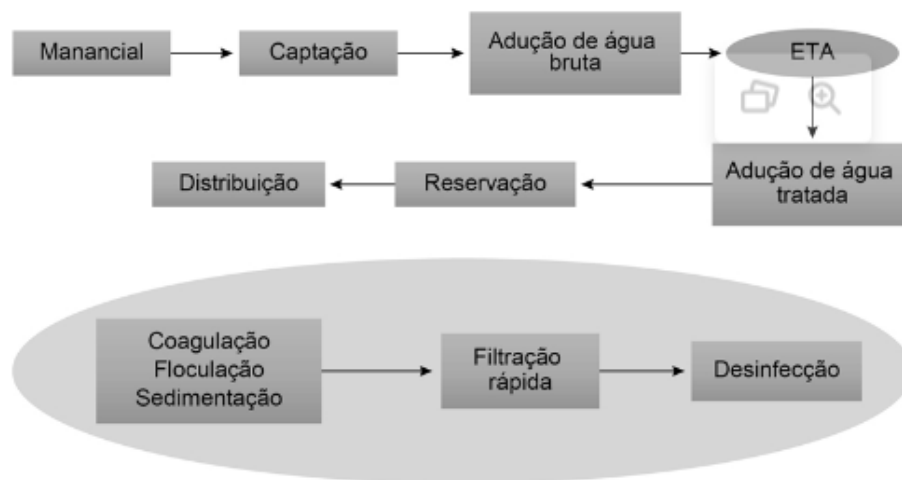
De acordo com Richter (2009), o tratamento convencional para águas de abastecimento é dependente de algumas etapas, são essas:

a) Pré-tratamento químico para produzir um floco sedimentável, com unidades sequenciais de mistura rápida, floculação e decantação (RICHTER, 2009):

b) Filtração como polimento para remover flocos residuais, em filtros comuns com até 4 metros de profundidade total (RICHTER, 2009).

A Figura 01, a seguir, demonstra graficamente as etapas necessárias para que o tratamento seja considerado convencional (etapas circuladas).

Figura 1 - Concepção clássica de estações de tratamento de águas (ETAs) convencionais.



Fonte: Seckler, 2022.

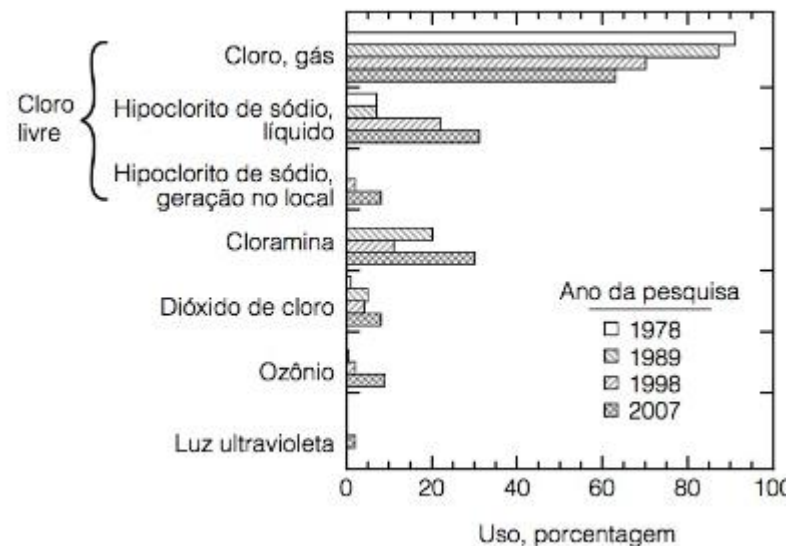
Além da Resolução CONAMA 357, a Portaria GM/MS nº 888 de 2021 também obriga que toda água para consumo humano fornecida coletivamente deverá passar por processo de desinfecção ou adição de desinfetante para manutenção dos residuais mínimos (BRASIL, 2021).

A desinfecção é um elemento essencial da estratégia global para o fornecimento de água segura para consumo. O tratamento pode incluir a remoção de microrganismos, primeiramente

por meio de filtração, ou a inativação dos mesmos. A inativação é o processo no qual os microrganismos são transformados, de modo que não sejam capazes de causar doença. (HOWE et al., 2016).

Cinco agentes de desinfecção são comumente utilizados para o tratamento de águas de abastecimento, o cloro livre, cloramina (cloro combinado com amônia), dióxido de cloro, ozônio e luz ultravioleta (UV) (HOWE et al., 2016). A Figura 2, a seguir, demonstra graficamente a distribuição referente ao uso de cada um desses desinfetantes para o tratamento de água de abastecimento.

Figura 2 – Produtos químicos utilizados para a desinfecção.



Fonte: HOWE et al., 2016.

O cloro é utilizado em grande parte das ETAs instaladas por sua aplicação simples, de baixo custo e por produzir residuais (protegendo o sistema de distribuição) (RICHTER, 2009). De acordo com Howe et al., (2016), a utilização de cloro é ainda recente, datado de 100 anos, com sua primeira aplicação regular acontecendo em 1908, em Chicago e New Jersey, nos Estados Unidos.

Em 1974, pesquisas apontaram a formação de subprodutos tóxicos durante processos de desinfecção da água por cloro, esses subprodutos são predominantemente clorofórmio, bromodiclorometano e bromofórmio (SYMONS et al., 1981; NETTO, A., 1987). Cinco anos depois, mais especificamente em 29 de novembro de 1979, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos estabeleceu um limite máximo de contaminantes denominados “Trihalometanos Totais” de 0,10mg/L (SYMONS et al., 1981).

No Brasil, desde a divulgação da primeira Portaria da Potabilidade, em 1990, até a atual, de maio de 2021, são estabelecidos Valores Máximos Permitidos (VMPs) em águas de abastecimento de 0,1mg/L para Trihalometanos totais (Triclorometano, Bromodiclorometano, Dibromoclorometano e Tribromometano) (BRASIL, 2021).

“Processos alternativos de desinfecção da água, que evitam a formação dos trihalometanos (TAM), são aqueles que não utilizam cloro livre, tais como: uso de cloraminas (cloro combinado), dióxido de cloro, ozonização e radiação ultravioleta, entretanto, estes podem levar a formação de outros subprodutos, conforme teor de matéria orgânica na água” (TOMINAGA; MIDIO, 1999 apud GORDON G., 1993, et al.). Estes processos mineralizam os contaminantes orgânicos, os destruindo e os transformando em dióxido de carbono (CO₂), águas e ânions inorgânicos (não tóxicos ou de menor potencial tóxico) (TEIXEIRA; JARDIM, 2004).

2.1 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS

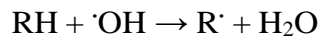
Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) são considerados alternativas promissoras às limitações dos processos convencionais, já que convertem a matéria orgânica em CO₂ (dióxido de carbono) e água, tornando poluentes complexos em biodegradáveis (AGUIAR et al., 2007).

Esses processos se caracterizam por transformar a grande maioria dos contaminantes orgânicos em dióxido de carbono, água e ânions inorgânicos, através de reações de degradação que envolvem espécies transitórias oxidantes, principalmente radicais hidroxila. (DOMÈNECH, et al., 2012). Além disso, podem ser usados para destruir compostos orgânicos tanto em fase sólida, líquida ou gasosa. São exemplos de POAs, Ozônio + radiação UV e Peróxido de Hidrogênio (H₂O₂) + radiação UV. (TEIXEIRA; JARDIM, 2004).

POAs possuem comum princípio, a espécie ativa responsável pela destruição dos contaminantes, na maior parte dos casos, é o radical hidroxila ($\cdot\text{OH}$), instável, bastante reativo e relativamente não seletivo, sendo capaz de oxidar a maioria dos compostos, não se restringindo a uma classe específica de contaminantes ((HAO; KIM; CHIANG, 2000); ROSADO, 2014). A produção do radical hidroxila pode ocorrer por aplicação da radiação ultravioleta ou utilização de agentes oxidantes fortes como ozônio (O₃) e peróxido de hidrogênio (H₂O₂), bem como por diferentes possibilidades de combinações provenientes da radiação e desses agentes oxidantes. Além disso, esse radical pode ser gerado por oxidação eletroquímica e/ou ultrassom (AZBAR; YONAR; KESTIOGLU, 2004).

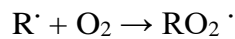
Segundo Nogueira, et al. (2007), os radicais hidroxila gerados são capazes de oxidar compostos orgânicos pela abstração do hidrogênio, gerando radicais orgânicos (Equação 1), posteriormente, com a adição de oxigênio, formam-se radicais peróxido (Equação 2), intermediários que iniciam reações térmicas e degradam a molécula à água, CO₂ e sais inorgânicos.

Equação 1 – Oxidação de compostos por abstração de hidrogênio;



Fonte: Nogueira et al, 2007.

Equação 2 – Formação de radicais peróxido;



Fonte: Nogueira et al, 2007.

Estudos realizados por Araújo, et al. (2014), demonstram um crescimento expressivo na publicação de artigos e na criação de patentes sobre POAs entre 2006 a 2015. Dentre os POAs mais utilizados, o tratamento de água por ozonização vem recebendo destaque devido ao seu elevado potencial para degradar, seja parcial ou totalmente, compostos persistentes que não são degradados em sistemas convencionais de tratamento (CHAVES et al., 2016).

De acordo com Araújo, et al. (2014) “Em termos de custo, a principal restrição da aplicação industrial dos POAs baseia-se no alto custo das fontes de energia como, irradiação UV e reagente (peróxido de hidrogênio e ozônio)”.

2.1.1 Ozônio

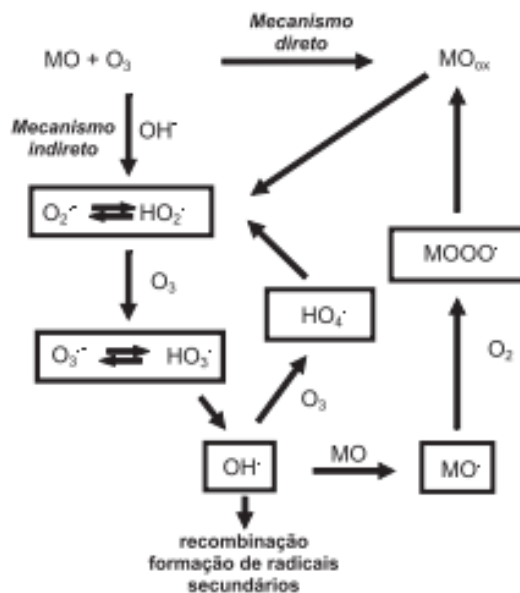
O Ozônio é um gás de meia vida e seu armazenamento é inviável, em altas concentrações é instável e explosivo; portanto, não pode ser armazenado no interior de recipientes pressurizados, sendo assim, o gás necessita ser gerado no local de sua aplicação (SCHIAVON et al., 2019; HOWE et al., 2016). É frequentemente empregado em Estações de Tratamento de Água para desinfecção, com objetivo de remover macro poluentes, incluindo remoção de gosto e odor da água e para degradação de micro poluentes orgânicos, compostos fenólicos e pesticidas... (KRUIHOF; MASSCHELEIN, 1999).

Atualmente o ozônio é conhecido como o segundo mais poderoso agente oxidante que pode ser utilizado em escala para aplicações em tratamento de água e vem sendo adotado por

diversos países e em milhares de sistemas de tratamento (SCHIAVON, 2012). Por seu alto poder oxidante ($E^\circ = 2,07V$), se comparado com outros agentes oxidantes como H_2O_2 ($E^\circ = 1,78V$), reage com numerosos contaminantes químicos, apresentando numerosas aplicações para situações mais exigentes ao tratamento convencional (MASTEN; DAVIES SIMON H. R, 1994).

A desinfecção ocorre principalmente pelo ozônio, enquanto os processos de oxidação podem acontecer pelo O_3 e radicais hidroxila ($\cdot OH$), que se formam pela decomposição do O_3 (MEUNIER; CANONICA; VON GUNTEN, 2006). A Figura 3, abaixo, demonstra como o Ozônio oxida a matéria orgânica diretamente (reação seletiva que geralmente apresenta constantes cinéticas lentas) e indiretamente (decomposição do O_3 para radicais hidroxila $\cdot OH$).

Figura 3 - Mecanismos de decomposição direta e indireta do ozônio em meio aquoso.



Fonte: MAHMOUD; FREIRE, 2006.

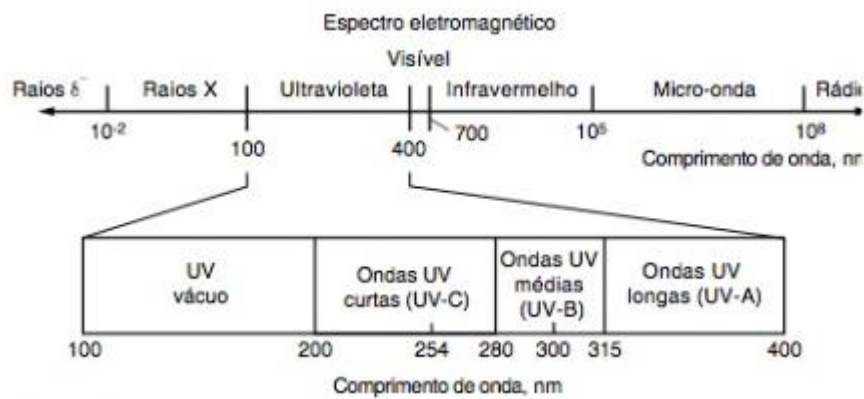
De acordo com Mahmoud e Freira (2006), o emprego do ozônio visando a formação de radicais hidroxila (POA) costuma ser mais utilizado. Os radicais, por serem menos seletivos e possuírem velocidade cinética de reação mais rápida são atualmente mais atrativos.

Sua eficiência geralmente está ligada à parâmetros de qualidade de água como concentração de carbono orgânico dissolvido (COD), alcalinidade, temperatura, pH e concentração de brometos (MEUNIER; CANONICA; VON GUNTEN, 2006). Kruithof e Masschelein (1999) propõem que, quando a ozonização for utilizada para fins de desinfecção de água de abastecimento, um padrão máximo de 10mg/L de brometo seja utilizado.

2.1.2 Luz ultravioleta (UV)

A luz UV é o nome dado para descrever a radiação magnética com comprimento de onda de 100 a 400nm, A Figura 4, a seguir, demonstra a divisão da UV pelo comprimento de onda. A luz no espectro UV pode ainda ser subdividida em quatro segmentos: UV vácuo, UV de onda curta UV-C (200-280nm), UV de onda média UV-B (280-315nm) e UV de onda longa UV-A (315-400nm); em particular UV-C é utilizada para inativação microbiana (HOWE et al., 2016; MEULEMANS, 1987).

Figura 4 - Localização da região da luz ultravioleta no espectro eletromagnético.



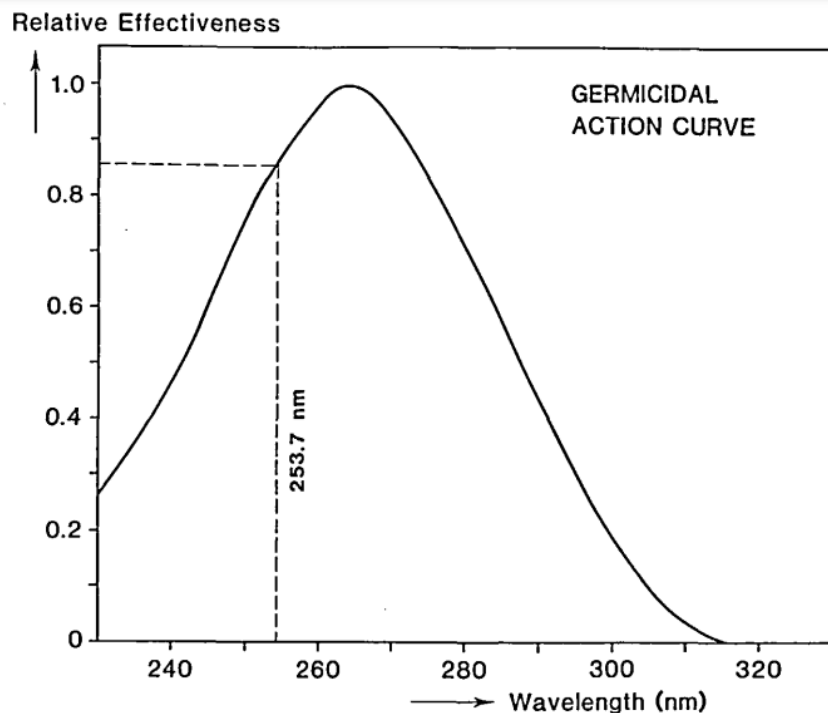
Fonte: HOWE, et al. 2016.

A luz UV age diretamente na célula, uma vez que as proteínas e ácidos nucleicos de DNA e RNA absorvem doses de UV, levando ao rompimento das membranas celulares e, conseqüentemente, à morte da célula. Devido a essa necessidade de penetração da luz no meio aquoso, águas com cor e turbidez de menor valor são mais atrativas (PARROTTA; BECKDASH, 1998)

O efeito germicida da radiação UV depende do comprimento da onda empregado no tratamento. De acordo com Meulemans, (1987), o comprimento de onda com maior efeito germicida é o de 265nm, conforme mostra Figura 5.

Martins, (2021) aponta dados parecidos de que a absorção máxima de UV ocorre entre 245nm e 285nm, atingindo potencial germicida máximo aos 260nm. Porém, a emissão máxima das lâmpadas de baixa pressão de vapor de mercúrio é de 254nm, usualmente não atingindo o potencial máximo de desinfecção.

Figura 5 - Curva da ação germicida da radiação UV.



Fonte: MEULEMANS, 1987.

A eficiência da destruição fotoquímica de qualquer composto pode alterar drasticamente o projeto do reator (tipo de lâmpada, geometria, hidrodinâmica, etc), fator limitante do consumo de energia e custo do sistema. Compostos formados por substâncias com elevada absorvidade e com altos teores de sólidos em suspensão não são adequados para o tratamento fotoquímico, já que a eficiência diminui por perda de luz, dispersão e absorção competitivas (DOMÈNECH, X. et al., 2012).

Para utilização da dosagem correta, procura-se uma média em que a desinfecção seja eficaz contra vários patógenos. Para isso, é feita a contagem de microrganismos presentes antes e depois da amostra passar pelo teste UV (DARTORA, 2020).

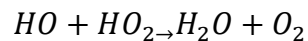
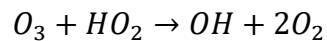
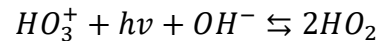
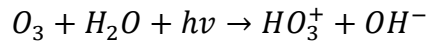
De acordo com PROSAB, 2021, essa técnica também pode ser empregada para pequenas comunidades, devido à operação prática proporcionadas pelo desenvolvimento de instalações comerciais.

2.1.3 O₃/UV

Devido ao fato de o ozônio possuir uma taxa de reação menor que a do radical hidroxila e em muitos casos promover uma mineralização incompleta, foram desenvolvidos outros

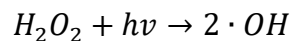
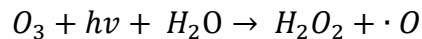
métodos de tratamento de água que geram oxidantes mais fortes, como ozônio e radiação UV e ozônio e peróxido de hidrogênio. A Equação 3 e 4, a seguir, representa a interação entre O_3/UV (ROSADO, 2014).

Equação 3 - Reações em cadeia UV+ Ozônio (formação de radicais hidroxila).



Fonte: PELEG, (1975).

Equação 4 - Interação química entre radiação UV e ozônio.

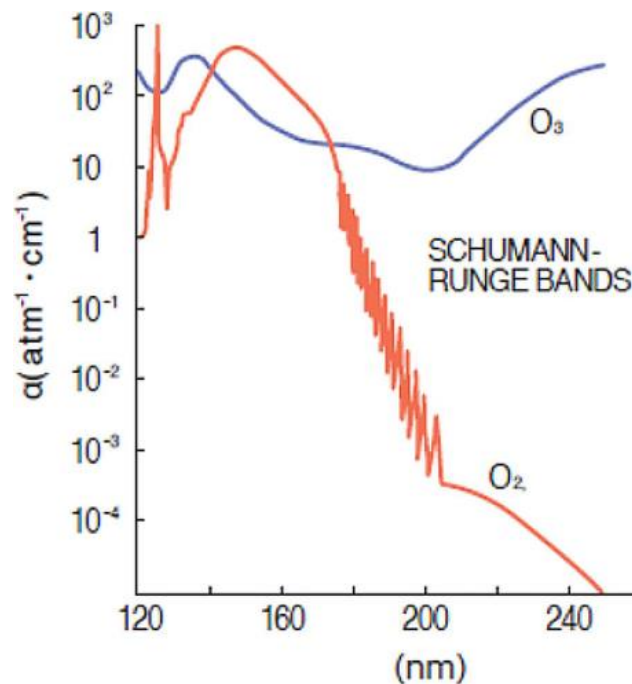


Fonte: ROSADO, (2014).

Muito parecido com qualquer outro POA, o sistema de O_3 em conjunto com radiação UV é usado para produzir radicais hidroxila $\cdot OH$ ($E^0 = +3,06$ V) por ser extremamente forte e não seletivo (MASTEN; DAVIES SIMON, 1994). Radicais hidroxila ou H_2O_2 , gerados pela decomposição do ozônio, apresentam cinética de reação mais rápida que o O_3 sozinho, esses degradam compostos orgânicos complexos para moléculas menores e mais simples, as tornando biodegradáveis (RATPUKDI; SIRIPATTANAKUL; KHAN, 2010; YU et al., 2021).

Como já citado, em 1987 constatou-se que a luz UV possui potencial germicida máximo quando emitida com comprimento de luz de 260nm (MEULEMANS, 1987). Em contrapartida, estudos recentes demonstram que em um sistema UV/ O_3 , a eficiência da geração do ozônio depende do comprimento de onda gerado pela lâmpada UV (absorção do UV pelo O_2 molecular), a eficiência máxima de dissociação do oxigênio pela luz UV emitida pela lâmpada é atingida na faixa de 160nm, enquanto a absorção do O_3 acontece aproximadamente nos 254 nm, que também leva à decomposição do O_3 e, com isso, à redução da concentração de ozônio na água (CLAUS, 2021). A Figura 6, abaixo, demonstra o citado.

Figura 6 - Dependência do comprimento de onda na absorção do Oxigênio.



Fonte: CLAUS, 2021.

A eficiência do sistema é superior ao O_3 e UV direto, além de ser o melhor sistema para tratamento de PCBs (poluentes orgânicos resistentes). Estudos realizados por LI, et al, (2023), demonstraram que a eficiência da remoção em paralelo de VUV (UV no vácuo) combinada com O_3 foi superior na remoção de um micro poluente característico (como o dodecilbenzeno sulfonato de sódio). O efeito sinérgico de VUV+ O_3 mineralizou 50,37% do poluente, enquanto VUV e O_3 isoladamente apresentaram remoção de 10,63% e 29,60%, respectivamente (LI et al., 2023).

O método pode ser aplicado em uma ampla gama de atividades, como na potabilidade de águas, tratamento de águas residuárias altamente contaminadas, desinfecção, descoloração de água de indústria de papel (DOMÈNECH et al., 2012), inativação de *Escherichia coli* (MAGBANUA; SAVANT; TRUAX, 2006), remoção de dióxido de silício (MÉNDEZ et al., 2019), entre outros.

Além do sistema ser utilizado para remoção de poluentes persistentes, é comum encontrar sistemas POU (Ponto de Uso) utilizando UV ou Ozônio.

2.2 TECNOLOGIAS DE PONTO DE USO

Considerando a falta de saneamento básico em regiões não urbanizadas e de doenças

causadas pela ingestão de água não segura, falta de higiene e falta de saneamento, tecnologias de Ponto de Uso (assim chamadas por sua aplicação no local de consumo da água), são divulgadas como opções para melhoria da qualidade microbiológica da água doméstica, reduzindo a incidência de doenças de veiculação hídrica (LANTAGNE; CLASEN, 2009). WHO, (2016) estima que a melhoria da distribuição de água segura, da higiene e do saneamento preveniria pelo menos 9,1% das doenças de veiculação hídrica e em 6,3% todas as mortes.

De acordo com Bailey (2021), embora os órgãos governamentais tentem fornecer serviços de saneamento básico para comunidades afastadas, uma medida temporária, porém imediata, pode ser a utilização de POU para tratamento e diminuição de riscos atrelados à doenças de veiculação hídrica.

A radiação UV já é bastante empregada em sistemas POU como tratamento complementar, além da utilização de sistemas UV ou UV/O₃, é comum se utilizar em situações emergenciais o hipoclorito de sódio, filtros de cerâmica, fervura e armazenamento seguro, e desinfecção solar (SODIS). Testes avaliativos para novas tecnologias POU seguem protocolos para atender níveis específicos de desempenho para inativação de vírus, bactérias, parasitas e protozoários (BAILEY et al., 2021; WHO, 2016).

2.3 COLIFORMES TOTAIS

A água potável não deve conter microrganismos patogênicos nem bactérias indicadoras de contaminação fecal, essas são especialmente as bactérias do grupo coliforme, sendo a *Escherichia coli* usualmente analisada. A Portaria da Potabilidade 888/2021 reitera a ausência total desse tipo de bactéria na água para consumo (BRASIL, 2021; FUNASA, 2013).

Esse grupo de bactérias é frequentemente usado como indicador de contaminação fecal da água por serem encontradas nas fezes de animais de sangue quente, serem facilmente detectáveis, por sua concentração possuir grau direto com contaminação e por serem mais resistentes aos agentes tensoativos, servindo de parâmetro para inativação de grande parte das bactérias mais frágeis, além de possuírem vários métodos disponíveis para sua quantificação, como a contagem por membranas filtrantes, tubos múltiplos ou por substratos cromogênicos. Esses indicadores são utilizados por limitações de ordem técnica, prática e econômica, já que é praticamente impossível quantificar todos os organismos patogênicos presentes na água (FUNASA, 2013; ELMUND; ALLEN; RICE, 1999; DE SOUZA; DANIEL, 2011).

2.4 ESPOROS DE BACTÉRIAS AERÓBIAS

Atualmente, *Cryptosporidium spp.* e *Giardia spp.* são exemplos de protozoários presentes em águas que representam contaminação fecal, estes apresentam grande desafio na produção de água segura para consumo humano, cistos gerados por esses microrganismos possuem resistência a processos de desinfecção, tornando-se, assim, bons indicadores quanto à eficiência do tratamento (BETANCOURT; ROSE, 2004).

A presença de protozoários como *Cryptosporidium spp.* e *Giardia spp.* já foram detectadas em diversos corpos de água e geralmente estão atrelados à contaminação fecal por descarga de efluentes a corpos hídricos que, posteriormente, servem de abastecimento de água à populações (HAMILTON et al., 2018).

A portaria da Potabilidade 888, em sua atualização de 2021, exigiu o ajuste de sistemas de desinfecção de água para que, quando identificado valores de *E. Coli* superiores a 1.000/100mL, sejam avaliados, semanalmente, esporos de bactérias aeróbias (EBA).

De acordo com a professora e pesquisadora Weruska Brasileiro, (2021), em entrevista ao grupo Hidrogeron, quando há uma boa remoção de bactérias aeróbias, é seguro dizer que há remoção de protozoários perigosos à saúde humana, já que, bactérias que possuem capacidade de gerar esporos são muito mais resistentes à doses de desinfetante, semelhante à protozoários. A mesma ainda destaca que a atualização da portaria foi um avanço, já que análises de *Cryptosporidium spp.* e *Giardia spp.* são muito mais complicadas e demoradas em comparação com análises de EBAs.

A similaridade desses protozoários com EBAs permitem essa alteração, com redução no tempo e na complexidade das amostras, houve uma melhora econômica nos processos (HIDROGERON, 2021).

3. METODOLOGIA

3.1 ÁGUA DE ESTUDO

O trabalho teve como foco principal a desinfecção da água de um corpo hídrico superficial utilizando reator UV/O₃. As amostras de água superficial, submetidas ao teste de desinfecção, foram coletadas de um lago localizado na Universidade Federal de Santa Maria, Campus Frederico Westphalen (coordenadas UTM 259826.94 m E; 6967729.03 m S) (GOOGLE EARTH, 2023), conforme figura 7.

A água bruta foi submetida a análises qualitativas de cor (aparente e verdadeira), turbidez, pH, temperatura, condutividade, carbono orgânico total, coliformes totais e *E. coli*. As amostras eram coletadas no mesmo dia dos testes de desinfecção. Os ensaios foram realizados em batelada e em escala de bancada.

Figura 7 - Localização do ponto de coleta de água para ensaios de desinfecção.



Fonte: GOOGLE EARTH, 2023.

3.2 REATOR UV/O₃

O reator foi desenvolvido em material PVC e com diâmetro de 100mm. A radiação UV era emitida por uma lâmpada UV monocromática de baixa pressão, com faixa de emissão de

comprimentos de onda entre 254 e 185nm. A entrada de ar era fornecida por um cooler de computador, o qual direcionava o fluxo de oxigênio para dentro do reator, para a geração de ozônio. A figura 8 demonstra o reator utilizado (CAVALHEIRO, 2023). O ozônio gerado dentro do reator era succionado por um compressor de ar e recirculado para a lâmina de água a ser tratada. A inserção do ozônio na água foi realizada por uma mangueira de ar.

Figura 8 - Reator UV/O₃ utilizado.



Fonte: CAVALHEIRO, 2023.

A avaliação da desinfecção por UV/ O₃ foi realizada em 3 repetições e a altura da lâmina de água adotada no reator foi de 4cm com os TDHs (tempos de detenção hidráulica) definidos em razão da absorbância e da dosagem do desinfetante (especificados a seguir, no item 3.2.1 e 3.2.2) (CAVALHEIRO, 2023).

Antes de cada ensaio, com o objetivo de esterilizar o reator e limpar qualquer residual que possa ter ficado de testes anteriores, a lâmpada era ligada por 15 minutos, o volume de 1,8 L de água bruta era inserido no reator e exposto à desinfecção. Durante o ensaio UV/O₃ era ligado o cooler, o compressor de ar e a lâmpada UV. Após cada batelada, o reator era higienizado com água destilada e esterilizado (pela ação da UV) por 3 minutos (CAVALHEIRO, 2023)

Todas as análises microbiológicas e físico-químicas foram realizadas nos laboratórios de Recursos Hídricos e de Microbiologia e Ecotoxicologia Aplicada da UFSM, Campus Frederico Westphalen em 3 dias distintos, 30/06/2023, 08/07/2023 e 14/07/2023.

3.2.1 DOSAGEM UV

A quantificação da dosagem emitida pela lâmpada foi feita utilizando um radiômetro (Ultra-Violet Radiometer; MRUR-203, Instrutherm®), os valores obtidos da intensidade de irradiação foram dados em mW/cm². “Os ensaios foram feitos em batelada e o tempo de detenção hidráulica (TDH) de cada batelada foi calculado conforme a Absorbância em 254 nm da água bruta, preconizando tempos que resultassem em dosagens de 1,68; 3,35; 5,04; 6,72 Wh/m³” (CAVALHEIRO, 2023).

Para realização dos cálculos da dosagem, utilizou-se as Equações 5, 6 e 7, a seguir.

Equação 5 – Dose aplicada de UV.

$$D_{aplic} = I_0 \times t$$

Fonte: MARTINS, 2021.

Equação 6 – Coeficiente de absorbância.

$$\alpha = 2,303 \times A$$

Fonte: MARTINS, 2021.

Equação 7 – Intensidade média do meio (Lei de Beer-Lambert).

$$I_m = \frac{I_0}{\alpha \times L}$$

Fonte: MARTINS, 2021.

Onde:

I_0 – Intensidade UV aplicada na amostra (mW*s⁻²);

t – Tempo de exposição (seg);

A – Absorbância da amostra;

I_m – Intensidade média no meio (mW/cm²);

L – Altura da lâmina da água (cm).

3.2.2 DOSAGEM OZÔNIO

A geração de ozônio foi realizada pelo método iodométrico (APHA, 2017). As dosagens de O₃ foram feitas em diferentes volumes de solução de Iodeto de Potássio 2% (KI) para lâminas de água de 2, 3 e 4cm, optando-se, por fim, pela lâmina de 4cm, para melhor observar o efeito

sinérgico entre UV e O₃, além de diminuir a perda de ozônio pelo borbulhamento (CAVALHEIRO, 2023).

A Equação 8, a seguir, demonstra a equação final utilizada no dimensionamento da dosagem de ozônio.

Equação 8 – Dosagem de ozônio.

$$D = \frac{P \times T \times 1000}{V \times 60}$$

Fonte: CAVALHEIRO, 2023.

Onde:

D – Dosagem de ozônio (mg/L)

P – Produção de ozônio (gO₃/L) – encontrado pelo teste com iodeto de potássio e pelo tempo de contato da amostra;

T – Tempo de contato (min);

V – Volume ozonizado (L).

3.3 EFICIÊNCIA DE DESINFECÇÃO

A eficiência de desinfecção foi analisada em função da inativação de coliformes totais, *Escherichia coli* e de Esporos de Bactérias Aeróbias (EBAs). As amostras foram inoculadas em placas de petri segundo o método da membrana filtrante (descrição da *Standard methods for the examination of water and wastewater*) (APHA *et al.*, 2012).

A eficiência da desinfecção foi quantificada segundo a Equação 9, a seguir.

Equação 9 – Eficiência de inativação microbiana – desinfecção.

$$\text{Inativação} = -\log \frac{N}{N_0}$$

Onde:

Inativação – log de inativação microbiana;

N_0 – contagem de colônias água bruta;

N – contagem de colônias pós desinfecção por reator UV/O₃.

Além do log de remoção, para facilitar o entendimento e a visualização dos resultados,

calculou-se também a porcentagem de remoção dos microrganismos, de acordo com a Equação 10, a seguir.

Equação 10 – Eficiência de inativação microbiana – desinfecção.

$$\text{Inativação (\%)} = \frac{N_0 - N}{N_0} \times 100$$

3.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

As análises físico-químicas realizadas de cor verdadeira, pH, temperatura e absorvância 254 nm foram feitas com o auxílio de equipamentos analíticos, apresentados na Tabela 1, a seguir e descritas na *Standard methods for the examination of water and wastewater* (APHA et al., 2012).

Tabela 1 - Equipamentos analíticos utilizados para análises físico-químicas;

Parâmetro	Equipamento utilizado
Cor verdadeira	Espectrofotômetro UV/vis
Turbidez	Turbidímetro
pH	pHmetro de bancada
Temperatura	Termômetro analógico de mercúrio
Absorvância 254 nm	Espectrofotômetro UV/vis

Fonte: autor, 2023.

3.5 ANÁLISES MICROBIOLÓGICAS

A eficiência da desinfecção foi analisada em função da inativação de Coliformes Totais (CT), *E. coli* e esporos de bactérias anaeróbias (EBAs). Para as três análises, seguiu-se a metodologia da membrana filtrante, descrita por APHA et al. (2017).

Para CT e *E. coli* o substrato Coliform Agar® foi utilizado como meio de cultura, posteriormente as amostras foram filtradas a vácuo em membranas de 0,45µm e, após a inoculação (passagem do meio filtrante para a placa de petri), as placas eram incubadas em estufa a 36 ± 1 °C por 24 horas. As colônias de cor lilás e salmão eram contabilizadas como coliformes totais e as azuis escuro como *E. coli*, conforme descrito por APHA et al. (2017).

Para os esporos de bactérias anaeróbias (EBAs), o substrato utilizado foi o Ágar Nutriente®, após o tratamento acima descrito, as amostras, em diferentes diluições, eram submetidas a tratamento térmico em banho maria a 80°C por 15 minutos. Em seguida, as amostras sofriam choque térmico, inseridas em banho de gelo até atingir temperatura ambiente. As amostras eram filtradas a vácuo em membranas de 0,45µm e incubadas por 24 horas, a 35°C, em meio ágar nutriente com azul de tripano. Todas as colônias formadas eram contabilizadas como esporos de bactérias aeróbia (CAVALHEIRO, 2023).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos resultados obtidos através da desinfecção conjugada de UV e de ozônio, pode-se verificar a eficiência total da desinfecção do sistema, bem como, a influência de parâmetros físico-químicos da água bruta.

Os resultados obtidos da dosagem de UV e de ozônio aplicados na lâmina de água de 4cm são apresentados na Tabela 2, abaixo.

Tabela 2 - Dosagens de O₃ e de UV aplicadas em cada amostra (4cm de lâmina d'água).

Dose	Tempo (min)	mgO₃/L	Wh/m³
D0	0	0	0
D1	1	0,16	1,68
D2	2	0,24	3,35
D3	3	0,43	5,04
D4	4	0,48	6,72

Fonte: CAVALHEIRO, 2023.

Segundo Kruithof e Masschelein, (1999), a dose de ozônio aplicada em diversas Estações de Tratamento de Água para desinfecção de água potável é de 1,5 a 3 mgO₃/L, superior ao usado no trabalho.

O Instituto Nacional Americano de Padronização (1991) especifica que sistemas de radiação UV devem ser utilizados apenas em águas visivelmente limpas (sem cor e turbidez aparentes) e que não possuam fontes de contaminação próximas. Ainda, o Instituto definiu duas classes de tratamento. Os sistemas classe A podem ser utilizados com ou sem com pré-filtração (sistemas POU) e são sistemas projetados para que remova bactérias e vírus até um nível seguro, este deve possuir dosagem mínima de 40 mWs/cm² e os conjuntos de classe B, que são sistemas projetados para tratamento bactericida complementar, devem possuir dosagem mínima de 16 mWs/cm².

As análises foram feitas em triplicata, em 3 dias distintos e os resultados físico-químicos obtidos, são apresentados a seguir, sequencialmente, da Tabela 3 a 5.

Tabela 3 - Resultados das análises físico-químicas (30/06/2023);

Dose	Tempo de exposição (min)	Cor verdadeira	Turbidez	pH	Temperatura	Absorbância
D0	0	12	10,5	6,90	9,50	0,108
D1	1	51	10,5	7,00	9,90	0,162
D2	2	31	10,5	6,95	9,90	0,121
D3	3	42	10,6	7,13	9,80	0,150
D4	4	49	10,5	6,95	9,70	0,162

Fonte: autor, 2023.

Tabela 4 - Resultados das análises físico-químicas (08/07/2023);

Dose	Tempo de exposição (min)	Cor verdadeira	Turbidez	pH	Temperatura	Absorbância
D0	0	17	2,08	6,71	20,00	0,106
D1	1	11	3,05	7,09	20,00	0,099
D2	2	11	3,97	6,97	20,00	0,096
D3	3	12	3,07	6,82	20,00	0,104
D4	4	11	1,28	6,86	20,00	0,102

Fonte: autor, 2023.

Tabela 5 - Resultados das análises físico-químicas (14/07/2023);

Dose	Tempo de exposição (min)	Cor verdadeira	Turbidez	pH	Temperatura	Absorbância
D0	0	13	8,00	6,64	10,10	0,103
D1	1	3	8,26	7,28	14,00	0,100
D2	2	6	7,83	7,10	13,00	0,099
D3	3	3	6,76	6,93	13,00	0,093
D4	4	2	6,61	7,10	12,00	0,102

Fonte: autor, 2023.

A turbidez e cor verdadeira se comportaram de maneira parecida durante as três análises,

variando pouco ou quase nada. No dia 30/06 a turbidez se manteve a mesma para todas as dosagens aplicadas de UV/O₃, nos dias seguintes, percebe-se uma variação positiva quanto ao parâmetro, observado em ambos, decréscimos de valores de D1 para D4, apresentando melhor índice na dosagem D4. A cor verdadeira também variou positivamente nos dias 08/07 e 14/07, diminuindo de 17, no bruto, para 11 no D4 e de 13, no bruto para 2, no D4. Os resultados do dia 30/06 demonstraram o oposto, aumentando os valores de cor verdadeira com o aumento da dosagem dos desinfetantes.

O pH da água bruta e de praticamente todos os ensaios de desinfecção realizados se manteve muito próximo a neutralidade, não demonstrando um padrão de redução ou ampliação, conforme aumento da dosagem de UV e ozônio. Fato este que pode ser avaliado pela faixa de variação do mesmo, sendo o menor valor encontrado durante os três dias de 6,64 e o maior valor de 7,28.

Alguns fatores físico-químicos são importantes na desinfecção por diversos motivos, a turbidez, por exemplo, está relacionada às partículas em suspensão presentes na água, que servem de “proteção” aos microrganismos alvos, interceptando parcela da radiação UV emitida (METCALF E EDDY, 2003).

Outro parâmetro físico-químico importante na inativação por UV/O₃ é a absorvância, que também está associada à concentração de sólidos suspensos, metais e componentes orgânicos e inorgânicos dissolvidos presentes na água (TEMPLETON; HOFMANN; ANDREWS, 2006).

Além de afetar negativamente a ação da radiação UV, a quantidade de sólidos suspensos presentes na água/efluente também é fator limitante para a atuação do O₃, que formam agregados de partículas e microrganismos, dificultando a ação efetiva do ozônio sobre os microrganismos (BILOTTA, 2000).

Em comparação, estudos realizados por Shi, et al (2021) revelaram que a aplicação de maiores doses de O₃ (5mg O₃/L) resultaram em bons valores na redução de cor e turbidez, alcançando valores de remoção de 46,6% e 49%, respectivamente.

De acordo com USEPA (2006), valores elevados de dureza e de pH também podem influenciar negativamente o processo de desinfecção, pois interferem na solubilidade de metais, podendo causar precipitação de carbonatos no reator.

A avaliação do pH é importante pois a ação catalítica dos íons hidroxila (pH mais básico), em conjunto com o O₃ geram radicais HO₂[•], que atuam sobre o Ozônio e auxiliam na geração de radicais hidroxila (ROSADO, 2014). De acordo com Sofá (2021), quanto maior o pH, mais facilmente o O₃ é convertido em radicais hidroxila, aumentando a taxa

de oxidação de contaminantes.

Li et al., (2023), estudou a eficiência da remoção em paralelo de VUV (UV no vácuo) de um micro poluente, sendo que, o pH demonstrou ligeira mudança na capacidade de desinfecção do sistema, resultando em maiores taxas de degradação quando o pH tendia a condições alcalinas fracas, apresentando melhores resultados no pH 9,0.

Para o ozônio, pHs mais baixos apresentam razoável degradação, favorecendo a oxidação direta pelo ozônio, em valores mais elevados ($> 7,5$), há predominância na formação de radicais hidroxila, aumentando a eficiência de geração e de reação, em contrapartida, há maior chance de gerar subprodutos (US EPA, 2006; AWWA, 1997).

“Segundo a Edstrom Industries Inc. (2003) para uma maior eficiência no tratamento de água por radiação UV, esta deve apresentar no máximo um valor de dureza de 120 mg.L^{-1} , ferro de $0,3 \text{ mg.L}^{-1}$, turbidez de 5 NTU, sólidos suspensos de 10 mg.L^{-1} e pH entre 6,5 e 9,5” (WISBECK et al., 2011 apud ESDSTROM INDUSTRIES INC, 2003).

No presente estudo, o pH, de acordo com a literatura, se manteve próximo ao limite mínimo para melhor funcionamento do reator, porém, ainda dentro da faixa considerada boa para reações fotoquímicas (6,5 a 9,5).

Os resultados microbiológicos obtidos pelos testes de desinfecção, são apresentados a seguir, sequencialmente, da Tabela 6 à 8.

Tabela 6 - Resultados das análises microbiológicas (30/06/2023);

Dose	Tempo (min)	Col. Totais	Log Redução	<i>E. coli</i>	Log Redução	EBA	Log Redução
D0	0	2,10E+03		1,00E+03		3.10E+03	
D1	1	1,10E+03	0,28	2,00E+02	0,70	1.60E+03	0,29
D2	2	1,30E+03	0,21	3,00E+02	0,52	1.50E+03	0,32
D3	3	4,70E+02	0,65	2,00E+02	0,70	8.00E+02	0,59
D4	4	6,00E+02	0,54	1,00E+00	4,00	7.00E+02	0,65

Fonte: autor, 2023.

Tabela 7 - Resultados das análises microbiológicas (08/07/2023);

Dose	Tempo (min)	Col. Totais	Log Redução	<i>E. coli</i>	Log Redução	EBA	Log Redução
D0	0	6,00E+03		1,00E+03		1.32E+04	

D1	1	1,30E+03	0,66	4,00E+02	0,40	7.00E+02	1,28
D2	2	1,00E+02	1,78	6,00E+01	1,22	7.00E+02	1,28
D3	3	6,00E+02	1,00	7,00E+01	1,15	1.20E+03	1,04
D4	4	5,00E+02	1,08	1,00E+01	2,00	5.00E+02	1,42

Fonte: autor, 2023.

Tabela 8 - Resultados das análises microbiológicas (14/07/2023);

Dose	Tempo (min)	Col. Totais	Log Redução	<i>E. coli</i>	Log Redução	EBA	Log Redução
D0	0	9,89E+03		2,00E+02		7.69E+03	
D1	1	1,70E+02	1,76	2,00E+02	0,00	3.90E+03	0,29
D2	2	1,40E+02	1,85	1,00E+02	0,30	4.20E+03	0,26
D3	3	4,00E+02	1,39	1,00E+02	0,30	2.60E+03	0,47
D4	4	2,00E+02	1,69	1,00E+02	0,30	1.40E+03	0,74

Fonte: autor, 2023.

As tabelas 9, 10 e 11 apresentam os resultados de inativação microbiana em %, estes resultados foram obtidos pela aplicação da equação 10, retro citada.

Tabela 9 - Inativação microbiana (Coliformes totais) das amostras;

Dose	Tempo de exposição (min)	Inativação Coliformes	Inativação Coliformes	Inativação Coliformes
		30/06 (%)	08/07 (%)	14/07 (%)
D0	0	0	0	0
D1	1	48	78	98
D2	2	38	98	99
D3	3	78	90	96
D4	4	71	92	98

Fonte: autor, 2023.

Tabela 10 - Inativação microbiana (*Escherichia coli*) das amostras;

Dose	Tempo de exposição (min)	Inativação <i>E.coli</i> 30/06 (%)	Inativação <i>E.coli</i> 08/07 (%)	Inativação <i>E.coli</i> 14/07 (%)
D0	0	0	0	0
D1	1	80	60	0
D2	2	70	94	50
D3	3	80	93	50
D4	4	100	99	50

Fonte: autor, 2023.

Tabela 11 - Inativação microbiana (Esporos de Bactérias Aeróbias - EBAs) das amostras;

Dose	Tempo de exposição (min)	Inativação EBA 30/06 (%)	Inativação EBA 08/07 (%)	Inativação EBA 14/07 (%)
D0	0	0	0	0
D1	1	48	95	49
D2	2	52	95	45
D3	3	74	91	66
D4	4	77	96	82

Fonte: autor, 2023.

De modo geral, os resultados se apresentaram satisfatórios, individualmente, as doses D4 e D2 se mostraram mais eficientes em relação às outras na remoção de CT, porém, a D4, pelo maior tempo de exposição, apresentou resultados ligeiramente melhores.

Para Coliformes Totais os valores de inativação foram relativamente bons, se considerarmos os dias 08/07 e 14/07, alcançou-se logs de inativação próximos de 2, sendo o melhor resultado do dia 14/07 (1,85 logs de inativação/ \cong 99% de inativação), na dosagem D2 (2 min). Para o dia 30/06, os resultados obtidos não foram tão bons quanto os outros dias, atingindo a maior % de remoção de apenas 78%, para tempo de exposição de 3 min (D3).

Para *Escherichia coli*, o resultado não mudou muito, apesar de visualizar melhor a diferença em cada uma das doses, valores ótimos de remoção foram encontrados no tempo de contato de 4 min (D4), que se mostrou bem mais eficiente nos dias 30/06 e 08/07. Para o dia 14/07, os dados se mantiveram iguais, porém apresentaram uma piora drástica em relação aos

outros dias.

Para as análises dos esporos de bactérias aeróbias (EBAs) os melhores valores encontrados foram os do dia 08/07, atingindo (%) de remoção na faixa dos 90% (log de redução próximos de 1). Entretanto, nos outros dias, é perceptível a melhora do sistema, com o aumento da dosagem dos desinfetantes, porém, os resultados foram piores, não atingido 90% de eficiência.

É comum uma maior dificuldade na inativação de esporos do que de coliformes ou *E. coli*, de acordo com Zoschke, Börnick e Worch (2014), esporos de bactérias são mais resistentes à radiação UV. Para comprimentos de onda de 245nm e de 185nm, o tempo de irradiação para inativação de EBAs é geralmente muito maior do que o tempo de irradiação para inativação de Coliformes Totais. De acordo com estudo realizado por Chang, et al. (1985), esporos de bactérias são até 9x mais resistentes que *E. Coli*.

Um estudo feito por Gomes Lobo, Passos Da Costa e Wisbeck, (2009) demonstrou valores pouco superiores aos obtidos na inativação de *E. coli* apenas por reator de radiação UV, obtendo eficiências de desinfecção próximas a 99,93% em caso de remoção para uma concentração celular conhecida de 0,1g/L (100mg/L) de *E. coli* e para tempo de exposição de 60 segundos. Neste mesmo estudo, quando diminuído o tempo de exposição no reator para 30s, observou-se uma redução significativa na remoção de *E. coli* para 89,75%.

Estudo realizado por Lourenção (2009) encontrou índices de inativação de *E. Coli* de efluente proveniente de reator UASB na ordem de -4 logs de inativação para dosagens de UV 3, 5 e 10 Wh/m³ e de ozônio de 5,6mg/L, aumentando a eficiência à medida que se aumenta a dose. Para Coliformes Totais o resultado foi parecido, dosagens de 5 Wh/m³ (UV) e de 5,6mg/L de O₃ atingiram logs de inativação na ordem de -4. No mesmo estudo, Lourenção constatou que CT são satisfatoriamente removidos se expostos 10 minutos a uma dosagem de 11 mgO₃/L, em conjunto com baixas doses de UV.

Conforme Chang, et al. (1985), para atingir eficiências de inativação de Coliformes Totais na ordem dos -3 logs (99,9% de inativação), é necessário uma dose UV de aproximadamente 10 mWs/cm², enquanto para *E.Coli* os mesmos -3 logs são atingidos com dosagens de UV de aproximadamente 6 -7 mWs/cm².

De acordo com Dartora (2020), a eficiência de desinfecção de um sistema UV simples construído se mostrou promissor, atingindo valores altos de inativação para tempos de exposição à radiação UV de 10 e 15 minutos.

Sabendo dos fatores que influenciam na eficiência da luz UV na desinfecção de água para abastecimento, é possível notar alguns padrões:

No primeiro dia de análise (30/06), é possível perceber que a alta turbidez ($\cong 10$) e cor aparente diminuíram perceptivelmente a eficiência do reator já que, quando comparado aos outros dias, coincidentemente, percebeu-se uma inferioridade nos resultados de inativação microbiana.

O pH se manteve parecido em todos os dias, não interferindo negativamente em nenhum dos casos. A temperatura foi um parâmetro bastante variado nos três dias de coleta e se configurou de acordo com as questões climáticas no dia da coleta, porém, a variação de temperatura geralmente não apresenta grandes alterações em ensaios de radiação UV, estudos indicam que para *E. coli*, por exemplo, a dose de radiação UV requerida para atingir um log de inativação de -2 diminui menos de 10% se aumentarmos a temperatura de 5°C para 35°C (US EPA, 2006).

Ademais, comparado com resultados obtidos na literatura, a eficiência do sistema se manteve um pouco abaixo dos valores indicados em literaturas comparadas, como o sistema é amplamente influenciado por variáveis ambientais e pelos parâmetros físico-químicos da água, é possível que houveram interferências desses fatores, conforme já mencionado.

5. CONCLUSÃO

Como a desinfecção por radiação UV e por O₃ dependem exclusivamente de fatores ambientais da área de estudo, como clima, tempo, temperatura, bem como a qualidade da água a ser tratada, vários aspectos influenciam negativamente no tratamento. Quando comparado à literatura, percebe-se que alguns parâmetros como turbidez, pH e cor das amostras tratadas não foram os melhores possíveis para o tratamento por UV/O₃, apresentando perda de eficiência no tratamento, perceptível quando comparado com resultados de outros trabalhos semelhantes.

De modo geral, o sistema apresentou alguns resultados satisfatórios na inativação dos microrganismos, valores de inativação 98%, 99,99% e 96% foram atingidos para Coliformes, *E. coli* e EBA, respectivamente. Ademais, comparado a literatura, os resultados obtidos se mantiveram um pouco abaixo do esperado.

Por fim, por mais que os resultados tenham sido satisfatórios em algumas análises, é necessário que se continue avançando com pesquisas aplicando POAs conjugados, mapeando zonas favoráveis de atuação de cada sistema de desinfecção para facilitar a aplicação em escala prática, a fim de utilização do procedimento como alternativa para descontaminação de águas em áreas emergenciais (POU).

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, André et al. **Mecanismo e aplicações da reação de fenton assistida por compostos fenólicos redutores de ferro.** Quim. Nova. [s.l: s.n.].

ANSI. **Ultraviolet (UV) Water Treatment Systems, NSF/ANSI 55-2022.** Disponível em: <https://blog.ansi.org/nsf-ansi-55-2022-ultraviolet-uv-water-treatment/#gref>. Acesso em: 10 nov. 2023.

APHA; AWWA; WEF. 2012. **Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water.** 22nd Edition. Washington D.C., USA.

APHA; AWWA; WEF. 2017. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 23rd edition. Washington D.C., USA.

ARAÚJO, Karla Santos et al. **Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de água residuais urbanas e efluentes industriais.** Revista Ambiente e Água, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2014.

AZBAR, Nuria; YONAR, T.; KESTIOGLU, K. **Comparison of various advanced oxidation processes and chemical treatment methods for COD and color removal from a polyester and acetate fiber dyeing effluent.** Chemosphere, v. 55, n. 1, p. 35–43, 2004.

BAILEY, Emily S. et al. **Methods, protocols, guidance and standards for performance evaluation for point-of-use water treatment technologies: History, current status, future needs and directions.** Water (Switzerland), [s. l.], v. 13, n. 8, p. 1–85, 2021.

BETANCOURT, Walter Q.; ROSE, Joan B. **Drinking water treatment processes for removal of Cryptosporidium and Giardia.** Veterinary Parasitology, 9 dez. 2004.

BILOTTA, Patrícia. **Estudo comparativo da ação do ozônio e radiação UV na desinfecção de esgoto sanitário.** São Carlos: Universidade de São Paulo, 2000.

BITTENCOURT, Cláudia; DE PAULA, Mária Aparecida Silva. **Tratamento de Água e Efluentes – Fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos.** São Paulo: Saraiva Educação S.A., 2014.

BRASIL. **Portaria da Consolidação nº 888 de maio de 2021.** Ministério da Saúde. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília. Disponível em: https://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 17 de out. 2023

BRASIL. **Lei nº 14.026, de 31 de julho de 2020.** Marco legal do Saneamento Básico. Brasília. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato20192022/2020/lei/114026.htm. Acesso em: 17 de out. 2023

BRASIL. **FUNASA.** Manual prático de análise de água. 4º ed. Disponível em:

https://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manual_pratico_de_analise_de_agua_2.pdfhtm. Acesso em: 03 de nov. 2023

BRASIL. **RESOLUÇÃO CONAMA 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfda_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf. Acesso em: 17 de out. 2023

CAVALHEIRO, Alexandra Lorini. **Tecnologia de Ponto-de-Uso (POU) para desinfecção de água para consumo humano: reator UV-Ozônio**. Rio Grande do Sul: Frederico Westphalen, 2023.

CHANG, John C. H. et al. UV Inactivation of Pathogenic and Indicator Microorganisms. **APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY**, v. 49, n. 6, p. 1361–1365, 1985.

CHAVES, Gabriela et al. **Tratamento de águas por ozonização: revisão**. Seminário de Iniciação Científica e Seminário Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão (SIEPE). **Anais...**Joaçaba: 12 set. 2016.

CLAUS, Holger. **Ozone Generation by Ultraviolet Lamps†. Photochemistry and Photobiology**. Blackwell Publishing Inc., 1 maio 2021.

DE SOUZA, Jeanette Beber; DANIEL, Luiz Antonio. **Synergism effects for Escherichia coli inactivation applying the combined ozone and chlorine disinfection method**. *Environmental Technology*, v. 32, n. 12, p. 1401–1408, 2011.

DOMENÈCH, Xavier; JARDIM Wilson F., LITTER Marta Y. **Procesos Avanzados de Oxidación: Parte 1: Procesos Avanzados de Oxidación para la reomción de contaminantes**. Disponível em: <https://estrucplan.com.ar/procesos-avanzados-de-oxidacion-parte-1-procesos-avanzados-de-oxidacion-para-la-eliminacion-de-contaminantes>. Acesso em 13 nov. 2023.

ELMUND, G. Keith; ALLEN, Martin J.; RICE, Eugene W. **Comparison of Escherichia coli, Total Coliform, and Fecal Coliform Populations as Indicators of Wastewater Treatment Efficiency**. *Water Environment Research*, v. 71, p. 332–339, maio 1999.

FUNASA. **Manual prático de análise de água**. 4. ed. Brasília: Funasa, 2013. 153 p. Disponível em: https://www.funasa.gov.br/site/wp-content/files_mf/manual_pratico_de_analise_de_agua_2.pdf. Acesso em: 28 out. 2023.

GOMES LOBO, Mara; PASSOS DA COSTA, Bruno; WISBECK, Elisabeth. **Avaliação da desinfecção de água por reator utilizando radiação ultravioleta**. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 36, n. 1, p. 21–36, 2009.

HAO, Oliver J.; KIM, Hyunook; CHIANG, Pen-Chi. **Decolorization of wastewater. Critical Reviews in Environmental Science and Technology**. CRC Press LLC, , 2000.

HELLER, Léo; PÁDUA, Valter Lúcio. **Abastecimento de água para abastecimento humano**. 11. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2006. v. 11

HIDROGERON. **Portaria 888/2021 – A grande novidade: esporos de bactérias aeróbias**. Arapongas, PR, 2021. Disponível em: <https://hidrogeron.com/portaria-888-2021-a-grande-novidade-esporos-de-bacterias-aerobias/>. Acesso em: 18 out. 2023.

HOWE, Kerry. et al. **Princípios de Tratamento de Água**. 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

KRUTHOF, Joop C.; MASSCHELEIN, Willy J. **State-of-the-Art of the Application of Ozonation in BENELUX Drinking Water Treatment**. Ozone Science & Engineering, v. 21, p. 139–152, 1999.

KUNZ, Airton; PERALTA-ZAMORA, Patrício. **Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis**. Quim. Nova. [s.l: s.n.].

LANTAGNE Daniele; CLASEN, Thomas. **Point of Use Water Treatment in Emergency Response**. Washington, outubro, 2009.

LI, Hang, et al. **Remediation of Surfactants Used by VUV/O3 Techniques: Degradation Efficiency, Pathway and Toxicological Analysis**. Molecules, v. 28, n. 8, 1 abr. 2023.

LOURENÇÃO, Juliana. **Avaliação da resistência de microrganismos patogênicos à desinfecção sequencial com Ozônio-Radiação Ultravioleta e Cloro-Radiação Ultravioleta**. São Paulo: São Carlos, 2009.

MAGBANUA, Benjamin; SAVANT, Gaurav; TRUAX, Dennis. **Combined ozone and ultraviolet inactivation of Escherichia coli**. Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, v. 41, n. 6, p. 1043–1055, 1 jul. 2006.

MAHMOUD, Amira; FREIRE, Renato Santos. **Métodos emergentes para aumentar a eficiência do ozônio no tratamento de águas contaminadas**. Quim. Nova, v. 30, n. 1, p. 198–205, 30 ago. 2006.

MARTINS, Ramiro José Espinheira. **A RADIAÇÃO ULTRAVIOLETA NA DESINFEÇÃO DE ÁGUAS RESIDUAIS DOMÉSTICAS**. 1. ed. Iguatu: Quipá Editora, 2021.

MASTEN, Susan J.; DAVIES SIMON H. R. **The use of ozonation to degrade organic contaminants in wastewaters**. Environmental Science & Technology, 1994.

MÉNDEZ, Perla Fabiola. et al. **Analysis of the UV–Ozone-Treated SnO₂ Electron Transporting Layer in Planar Perovskite Solar Cells for High Performance and Reduced Hysteresis**. Solar RRL, v. 3, n. 9, 1 set. 2019.

METCALF & EDDY. **Engenharia de Águas Residuais: Tratamento e Reutilização**. 4^a ed., McGraw-Hill, Nova York, 2003.

MEULEMANS, C. C. E. **The basic principles of UV-disinfection of water**. *Ozone: Science & Engineering*, v. 9, n. 4, p. 299–313, 1 set. 1987.

MEUNIER, Laurence; CANONICA, Silvio; VON GUNTEN, Urs. **Implications of sequential use of UV and ozone for drinking water quality**. *Water Research*, v. 40, n. 9, p. 1864–1876, 1 maio 2006.

MEZZANOTTE, V. et al. **Wastewater Disinfection Alternatives: Chlorine, Ozone, Peracetic Acid, and UV Light**. *Water Environment Research*, v. 79, n. 12, p. 2373–2379, nov. 2007.

NOGUEIRA, Raquel F. Pupo et al. **FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES AMBIENTAIS DOS PROCESSOS FENTON E FOTO-FENTON** *Quim. Nova*. [s.l.: s.n.].

PELEG, M. **The chemistry of ozone in the treatment of water**. *Water Research*, p. 361–365, 1975.

PROSAB. **Métodos Alternativos de Desinfecção de Água**. São Carlos: Rima e Artes e Textos, 2001.

RATPUKDI, Thunyalux; SIRIPATTANAKUL, Sumana; KHAN, Eakalak. **Mineralization and biodegradability enhancement of natural organic matter by ozone-VUV in comparison with ozone, VUV, ozone-UV, and UV: Effects of pH and ozone dose**. *Water Research*, v. 44, n. 11, p. 3531–3543, 2010.

RICHTER, Carlos A. **Água - Métodos e Tecnologia de Tratamento**. 1. ed. [s.l.] Blucher, 2009.

ROSADO, Francisca Gabriela Lopes. **Aplicação da ozonização e de Processos Oxidativos Avançados na degradação de fármacos paracetamol e dipirona presentes em efluentes aquosos simulados**. 2014—Diamantina : Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, 15 dez. 2014.

SCHIAVON, G. J. et al. **Projeto e Análise de um Sistema Gerador de Ozônio para Remoção de Cor de Efluente Têxtil**. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 8, p. 171–187, 2019.

SECKLER, Sidney. **Tratamento de Água - Concepção, Projeto e Operação de Estações de Tratamento**. 1. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2022.

SPERLING, Marcos, **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**, v.01. Minas Gerais: ABES, 1995.

SHI, Qi et al. **Efficient synergistic disinfection by ozone, ultraviolet irradiation and chlorine in secondary effluents**. *Science of the Total Environment*, [s. l.], v. 758, 2021.

SYMONS, James M. et al. **Removing Trihalomethanes from Drinking Water - An Overview of Treatment Techniques**. *WATER/ Engineering & Management*, p. 50–64, nov.

1981.

TEIXEIRA, Cláudia Poli de Almeida Barêa; JARDIM, Wilson de Figueiredo. **Processos Oxidativos Avançados Conceitos teóricos..** Campinas: [s.n.]. v. 3

TEMPLETON, M. R.; HOFMANN, R.; ANDREWS, R. C. **UV inactivation of humic-coated bacteriophages MS2 and T4 in water.** Journal of Environmental Engineering and Science, v. 5, n. 6, p. 537–543, 2006.

TOMINAGA, Maria Y.; MIDIO, Antonio F. **Exposição humana a trihalometanos presentes em água tratada.** Revista de Saúde Pública, v. 33, n. 4, p. 413–421, 1999.

US EPA. **Long Term 2 Enhanced Surface Water treatment Rule.** United States Environmental Protection Agency, [s. l.], p. 1–375, 2006. Disponível em: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2006-01-05/pdf/06-4.pdf>. Acesso em: 18 de out. 2023

USGS. **Emerging Contaminants.** United States Geological Survey, [s. l.], 2019. Disponível em: <https://www.usgs.gov/mission-areas/water-resources/science/emerging-contaminants>. Acesso em: 18 de out. 2023

WISBECK, Elisabeth et al. **Desinfecção de água de chuva por radiação ultravioleta.** Engenharia Ambiental e Sanitária, v. 16, n. 4, p. 337–342, 2011.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the burden of disease from environmental risks.** 2016.

YU, Xiaobin et al. **Advanced oxidation of benzalkonium chloride in aqueous media under ozone and ozone/UV systems – Degradation kinetics and toxicity evaluation.** Chemical Engineering Journal, v. 413, 1 jun. 2021.