


OZONIZAÇÃO COMO PROCESSO DE DESINFECÇÃO DA ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO: EFICIÊNCIA E SUSTENTABILIDADE

 <https://doi.org/10.56238/arev7n5-226>

Data de submissão: 14/04/2025

Data de publicação: 14/05/2025

Arthur Joaquim de Araújo Ferreira

Mestrando Programa de Pós-graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental pelo Instituto de Tecnologia e Educação Galileo do Amazonas.

Fábio Rodrigues

Professor-Pesquisador da Universidade do Estado do Amazonas-UEA. Mestre em Políticas de Gestão Ambiental pela Universidade Federal do Amazonas-UFAM.
E-mail: fbio1961@gmail.com

Simone da Silva

Orientadora do Curso de Pós-graduação em Engenharia, Gestão de Processos, Sistemas e Ambiental pelo Instituto de Tecnologia e Educação Galileo do Amazonas. Doutora em Biotecnologia Vegetal pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.
E-mail: simonydasilva@gmail.com

RESUMO

A desinfecção da água é um processo essencial para garantir a eliminação de microrganismos patogênicos, odores e sabores indesejáveis, sendo um tema de grande relevância para a saúde pública. Entre as tecnologias emergentes, a aplicação do ozônio na purificação da água tem atraído crescente interesse devido à sua alta eficiência e potencial sustentável. Este estudo tem como objetivo analisar a eficácia e a sustentabilidade da ozonização como método de desinfecção da água, comparando suas vantagens, limitações e impactos ambientais em relação a processos convencionais no município de Itajaí/SC. Os objetivos específicos incluem: (i) investigar os princípios físico-químicos e o mecanismo de ação da ozonização na desinfecção da água; (ii) avaliar sua viabilidade técnica e econômica, considerando fatores como custo, tempo de reação, segurança operacional e aceitação regulatória no contexto local; e (iii) examinar seus impactos ambientais, incluindo a geração de subprodutos, consumo energético e sustentabilidade do processo. A pesquisa adotou uma abordagem qualitativa, combinando revisão bibliográfica, experimentação e estudo de caso. Os resultados indicaram que a ozonização apresenta alta eficácia na inativação de bactérias, vírus e protozoários, sendo superior ao cloro, especialmente contra microrganismos resistentes. O ozônio demonstrou ação rápida e independente do pH da água, ao contrário do cloro, cuja eficácia pode ser reduzida em determinadas condições. Além disso, verificou-se que a combinação da ozonização com a cloração sequencial promove um efeito sinérgico, potencializando a desinfecção. Conclui-se que a ozonização é uma alternativa viável e sustentável para a desinfecção da água, com potencial para otimizar os processos de saneamento no município estudado.

Palavras-chave: Ozônio. Desinfecção da água. Sustentabilidade. Purificação da Água.

1 INTRODUÇÃO

A contaminação da água por microrganismos patogênicos representa um desafio significativo para a saúde pública global. Dentre os parasitas mais difundidos, *Giardia* e *Cryptosporidium* destacam-se por sua ampla distribuição e impacto epidemiológico. Estima-se que a *Giardia* seja responsável por aproximadamente 280 milhões de casos sintomáticos de diarreia anualmente, enquanto *Cryptosporidium* está associado a 8,6 milhões de casos de doenças transmitidas por alimentos, gerando repercussões econômicas significativas (SCHNELL et al., 2016).

A vigilância da qualidade da água é uma responsabilidade compartilhada entre autoridades municipais, estaduais e o Ministério da Saúde, sendo regulamentada pelo Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água para Consumo Humano (Vigiagua, 2006). Essa política pública tem como objetivo promover a saúde e prevenir doenças de veiculação hídrica, conforme estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

Os métodos de desinfecção da água mais utilizados atualmente baseiam-se no uso de biocidas oxidantes, como o cloro. Embora amplamente empregado no abastecimento público, o cloro pode gerar subprodutos tóxicos, como os trihalometanos e os ácidos haloacéticos, que apresentam riscos à saúde humana (ZARPELLON e RODRIGUES, 2002; NIKOLAOU et al., 2004). Como alternativa, a ozonização tem sido amplamente estudada por sua eficiência na desinfecção da água, utilizando o gás O₃ como agente oxidante. Esse método se destaca pelo alto poder de inativação de microrganismos, incluindo bactérias e protozoários patogênicos, além de não gerar trihalometanos. No entanto, dependendo da composição química da água, pode resultar na formação de outros subprodutos, como bromatos (PANDISELVAM et al., 2017).

A presente pesquisa foi conduzida no município de Itajaí/SC, pela empresa Kairós Comércio de Purificadores de Água Ltda., e teve como área de estudo a Bacia do Rio ItajaíAçu. Com aproximadamente 15.000 km² de extensão, essa bacia hidrográfica é a maior da vertente atlântica do Estado de Santa Catarina e desempenha um papel fundamental no abastecimento hídrico da região.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo geral analisar a eficiência e a sustentabilidade da ozonização como processo de desinfecção da água, destacando suas vantagens, limitações e impactos ambientais em comparação a métodos convencionais no município de Itajaí/SC. Os objetivos específicos incluem: a) Investigar os princípios físico-químicos da ozonização e seu mecanismo de ação na desinfecção da água; b) Identificar as vantagens e limitações da aplicação da ozonização, considerando aspectos como custo, viabilidade técnica, tempo de reação, segurança operacional e aceitação regulatória no contexto local; c) Avaliar os impactos ambientais

da ozonização em comparação aos métodos convencionais, incluindo a geração de subprodutos e a sustentabilidade do processo no abastecimento de água em Itajaí/SC.

A pesquisa adotou uma abordagem qualitativa, com metodologia experimental e bibliográfica, favorecendo a descrição, interpretação e análise dos dados obtidos. A coleta de dados foi realizada por meio de laudos técnicos do processo de ozonização da água.

Os resultados indicaram que a ozonização apresentou maior eficiência na inativação de bactérias, vírus e outros patógenos em comparação aos desinfetantes convencionais, como o cloro. Isso se deve ao fato de que esses microrganismos, mais resistentes aos desinfetantes tradicionais, são mais suscetíveis à oxidação direta promovida pelo ozônio. Além disso, a ozonização ocorre de forma rápida e independente do pH da água, diferentemente do cloro, cuja eficácia é reduzida em determinados níveis de acidez ou alcalinidade. Foi observado, ainda, que a desinfecção sequencial (ozônio seguido de cloro) apresenta um efeito sinérgico, combinando os mecanismos de ação de ambos os desinfetantes e potencializando a eficiência do processo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 PRINCÍPIOS FÍSICO-QUÍMICOS DA OZONIZAÇÃO NA REMOÇÃO DE CONTAMINANTES NA DESINFECÇÃO DE ÁGUA

O ozônio foi identificado por Van Marum em 1785; no entanto, apenas em 1840, Schönbein evidenciou que o ozônio era um gás que poderia ser gerado por meio de uma descarga elétrica no ar atmosférico, denominando-o de "ozônio", derivado do grego *ozein* (Gerrity et al., 2017; Pandiselvam et al., 2017).

A ozonização é um processo que emprega o ozônio (O_3), uma molécula triatômica de oxigênio, como agente oxidante em diversas aplicações industriais, ambientais e sanitárias. O ozônio é um gás instável, de coloração azulada em altas concentrações, e possui um odor característico. Sua instabilidade decorre da tendência de decomposição em oxigênio molecular (O_2), especialmente em temperaturas elevadas. A solubilidade do ozônio em água é relativamente baixa e diminui com o aumento da temperatura; por exemplo, a $0^\circ C$, sua solubilidade é de 640 mg/L, enquanto a $60^\circ C$ torna-se praticamente insolúvel (MyOzone, 2023).

O primeiro uso documentado do ozônio na desinfecção de água ocorreu em 1886, na cidade de Oudshoorn, Holanda, quando De Meritens o utilizou para tratar as águas do rio Reno após processos de sedimentação e filtração (Diaper, 1975; Johnson, 1975). A partir dessa aplicação bem-sucedida, mais de 1.000 instalações foram implementadas em diversos países, incluindo Rússia,

Canadá, Suíça, Alemanha e França, visando a desinfecção da água para consumo humano (Johnson, 1975).

Uma das principais características do ozônio é seu elevado potencial de oxidação, de aproximadamente +2,07 V, superior ao do cloro (+1,36 V) e do oxigênio (+1,23 V), ficando atrás apenas do flúor e do radical hidroxila. Esse elevado potencial torna o ozônio um agente oxidante eficaz contra uma ampla variedade de compostos orgânicos e inorgânicos, incluindo microrganismos patogênicos, como bactérias, vírus e protozoários (Philozon, 2023).

Atualmente, o ozônio é amplamente utilizado em processos de decomposição de matéria orgânica e desinfecção na potabilização de águas, principalmente em países desenvolvidos. Seu poder de oxidação supera o do peróxido de hidrogênio e do cloro, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Potencial de oxidação de oxidantes fortes

Espécie oxidante peróxido de hidrogênio e o cloro.	Potencial de oxidação E° (Volts)
Flúor	(+2,87)
Radical hidroxila	(+2,80)
Ozônio	(+2,07)
Peroxido de hidrogênio	(+1,77)
Permanganato	(+1,68)
Dióxido de cloro	(+1,50)
Cloro	(+1,36)
Bromo	(+1,07)
Iodo	(+0,54)

Fonte: (Reiff e Witt, 2017)

O ozônio é um gás de coloração azul pálida, com um odor característico forte e irritante. Suas principais propriedades físico-químicas estão resumidas na Tabela 2.

Tabela 2. Principais propriedades do ozônio gasoso

Cor	Incolor a azulado, função da concentração
Cheiro	Odor pungente distinto irritante (detectado em concentrações superiores a 0,01ppm). E, desagradável (odor sulfuroso) acima de 2ppm
Massa molecular	48 g.mol ⁻¹
Ponto de fulgor	Não aplicável

Ponto de fusão	-111,3°C
Ponto de ebulição	-112 °C
Temperatura crítica	-12,1°C
Densidade do gás	2,14 kg.m ⁻³
Coefficiente de difusão do ozônio no ar 2,5	cm ² .s ⁻¹
Viscosidade dinâmica do ozônio gasoso	1,90 x 10 ⁻⁵ kg.m-1s-1

Fonte: (myOzone, 2023)

No processo de desinfecção de água, uma das principais vantagens do ozônio é a redução da formação de subprodutos tóxicos, uma vez que seu alto poder de oxidação permite a degradação rápida de compostos orgânicos. Ademais, a ozonização pode prolongar a segurança microbiológica da água, reduzindo a presença de microrganismos ao longo do tempo. Comparada a outros agentes desinfetantes, como o cloro, a ozonização tende a gerar menos subprodutos indesejáveis, tornando-se uma alternativa atrativa para a melhoria da qualidade da água potável (Agriambi, 2015).

A solubilidade do ozônio em água a 25°C é de aproximadamente 12 mg/dm³, formando uma solução instável. Parte do ozônio dissolve-se, enquanto outra fração é perdida por evaporação ou por reações em cadeia com moléculas de água (Mahmoud et al., 2007).

2.2 VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA APLICAÇÃO DA OZONIZAÇÃO NA DESINFECÇÃO DA ÁGUA, ANALISANDO CUSTOS, VIABILIDADE TÉCNICA, TEMPO DE REAÇÃO E SEGURANÇA OPERACIONAL

A ozonização é um método alternativo de purificação da água que consiste na injeção de gás ozônio para eliminar impurezas e evitar a proliferação de microrganismos. Esse processo é altamente eficiente, pois o ozônio é capaz de oxidar e destruir uma ampla variedade de contaminantes, como bactérias, vírus, fungos e compostos orgânicos, sendo 3.120 vezes mais rápido que o cloro em sua ação oxidante. Reconhecido como um tratamento seguro pela FDA dos Estados Unidos, o ozônio é amplamente utilizado em Estações de Tratamento de Água (ETAs) e Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) em países como Japão, França, Holanda, Estados Unidos e Canadá. Esse tratamento é eficaz na eliminação de matéria orgânica, organismos patogênicos e substâncias tóxicas, incluindo metais pesados e fármacos. Estudos demonstram que a oxidação com ozônio pode remover de 90% a 100% de contaminantes como BPA, EE2, E2, ibuprofeno e norfloxacino, quando utilizadas doses superiores a 1 mg/L.

Entre as principais vantagens do uso do ozônio, destacam-se sua ação desinfetante rápida e de amplo espectro, a eliminação de sabor, cor e odores desagradáveis, a melhora da floculação da matéria orgânica, a ausência de resíduos prejudiciais ao meio ambiente, já que seu subproduto é oxigênio, e a produção no local de aplicação, reduzindo riscos e custos com transporte e armazenagem de produtos químicos. Além disso, o ozônio reage com metais pesados, promove a micro precipitação de patógenos e pirógenos, destrói hidrocarbonetos e eleva o potencial redox da água, facilitando a remoção de impurezas. No Brasil, o tratamento de água é regulamentado pelo Ministério da Saúde, por meio da Portaria de Consolidação nº 5/2017, que estabelece os padrões de qualidade da água potável.

Entretanto, o processo de ozonização também apresenta limitações, como a baixa estabilidade do ozônio, que exige sua geração e aplicação imediata, a possibilidade de formação de subprodutos potencialmente tóxicos, como bromatos, a variação da eficiência conforme a qualidade da água bruta e a necessidade de operadores qualificados para o controle do processo. Além disso, o custo inicial para implementação do sistema de ozonização é elevado, devido ao alto preço dos equipamentos geradores de ozônio e ao consumo energético significativo do processo. A manutenção também requer monitoramento contínuo e substituição de componentes como eletrodos e compressores, além da necessidade de controle dos subprodutos gerados.

Apesar desses desafios, a viabilidade técnica da ozonização é elevada, pois o método é compatível com diferentes fontes de água, atua na eliminação de microrganismos resistentes ao cloro, melhora a qualidade organoléptica da água e pode ser combinado com outros tratamentos para garantir residual desinfetante na rede de distribuição. O tempo de reação do ozônio é extremamente rápido, ocorrendo em segundos ou minutos, mas sua meia-vida curta (de 10 a 30 minutos) impede sua permanência prolongada na rede. Do ponto de vista da segurança operacional, é necessário um monitoramento rigoroso para evitar vazamentos, pois o ozônio é tóxico em altas concentrações. Medidas como sensores, sistemas de ventilação e decomposição controlada do excesso de ozônio são essenciais para garantir a segurança dos operadores.

Em relação à aceitação regulatória, a ozonização é reconhecida por órgãos como a USEPA (Agência de Proteção Ambiental dos EUA) e a OMS (Organização Mundial da Saúde). No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888/2021 regulamenta seu uso para tratamento de água potável, porém sua implementação em larga escala exige adaptações nas estações de tratamento e conformidade com diretrizes de segurança. Assim, a ozonização representa uma alternativa eficiente e sustentável para a desinfecção da água, desde que sejam superados os desafios técnicos, operacionais e financeiros para sua implementação.

2.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DA OZONIZAÇÃO EM COMPARAÇÃO AOS MÉTODOS CONVENCIONAIS E SUSTENTABILIDADE DO PROCESSO NO ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM ITAJAÍ/SC

A sustentabilidade do processo de ozonização no abastecimento de água de Itajaí/SC deve ser analisada considerando seu impacto ambiental, eficiência energética e viabilidade técnica. Diferente dos métodos convencionais, como a cloração, que gera subprodutos persistentes e potencialmente tóxicos, a ozonização se destaca por não deixar resíduos químicos prejudiciais ao meio ambiente, pois o ozônio se decompõe rapidamente em oxigênio molecular.

Essa característica reduz a carga de compostos orgânicos persistentes nos corpos hídricos, contribuindo para a preservação dos ecossistemas aquáticos e a qualidade da água consumida pela população.

Outro fator relevante é a pegada de carbono do processo. A geração de ozônio ocorre por meio da eletrólise ou descarga elétrica em oxigênio, o que pode resultar em um consumo energético elevado, especialmente em larga escala. No entanto, avanços tecnológicos vêm permitindo a otimização dos sistemas de geração de ozônio, tornando-os mais eficientes e menos dispendiosos em termos energéticos (MUNTER, 2017). Além disso, a menor necessidade de produtos químicos auxilia na redução dos impactos ambientais associados à fabricação, transporte e descarte de agentes desinfetantes convencionais.

A aplicação da ozonização na rede São Roque de captação de água, gerenciada pelo SEMASA, pode trazer benefícios ambientais significativos. O uso dessa tecnologia pode reduzir a dependência de cloro e coagulantes químicos, minimizar a geração de lodo contaminado e melhorar a remoção de contaminantes emergentes, como resíduos de fármacos e pesticidas, que os métodos tradicionais nem sempre eliminam de forma eficiente. Estudos apontam que a combinação de ozonização com outros processos, como a filtração por carvão ativado, pode aumentar ainda mais a eficiência na remoção de substâncias orgânicas recalcitrantes, reduzindo a necessidade de retratamento da água e melhorando a qualidade final do abastecimento (VON GUNTEN, 2003).

Assim, a implementação da ozonização em Itajaí deve ser acompanhada de estudos detalhados sobre a qualidade da água bruta, a otimização do processo para evitar a formação de subprodutos indesejados e a análise da viabilidade econômica e ambiental em comparação com os métodos já utilizados. A transição para uma tecnologia mais sustentável deve considerar os custos operacionais e de manutenção, mas os benefícios a longo prazo, como a redução da contaminação química e a melhoria da saúde pública, podem justificar esse investimento. Dessa forma, a ozonização

se apresenta como uma alternativa viável para o abastecimento de água, promovendo maior segurança sanitária e ambiental.

2.3.1 Comparativo entre ozonização e métodos convencionais

A escolha do método de desinfecção da água depende de fatores como eficiência na remoção de contaminantes, impacto ambiental, custos operacionais e formação de subprodutos. A cloração é amplamente utilizada no Brasil devido ao seu baixo custo e eficiência na desinfecção. No entanto, esse método pode gerar subprodutos tóxicos, como os trihalometanos (THMs) e os ácidos haloacéticos (AHAs), ambos associados a riscos carcinogênicos (VON SPERLING, 2014). Além disso, alguns microrganismos resistentes ao cloro, como *Cryptosporidium* e *Giardia*, podem permanecer na água tratada, devido à sua camada externa protetora. O cloro também apresenta limitações na remoção de contaminantes químicos emergentes, como resíduos farmacêuticos e pesticidas, exigindo processos complementares para sua eliminação.

A desinfecção por UV utiliza radiação com comprimento de onda entre 200 e 280 nm para destruir o material genético de patógenos, inativando sua capacidade de replicação (COSTA et al., 2018). Esse método é eficaz contra protozoários resistentes à cloração, como *Cryptosporidium*, e não gera subprodutos químicos prejudiciais. No entanto, sua principal limitação é a ausência de um residual desinfetante, o que pode permitir recontaminação ao longo da rede de distribuição. Assim, esse método é mais indicado para sistemas de tratamento próximos ao ponto de consumo.

A filtração com carvão ativado é eficaz na remoção de compostos orgânicos, pesticidas e metais pesados, além de reduzir o cloro residual e melhorar características sensoriais da água, como sabor e odor (ACT.CARBON, 2023). Entretanto, essa tecnologia apresenta algumas limitações:

- Baixa remoção de compostos inorgânicos: não é eficaz na eliminação de nitratos, metais pesados e sais dissolvidos.
- Saturação e necessidade de troca regular: o carvão ativado pode se esgotar rapidamente em águas com alta carga orgânica, exigindo substituição frequente.
- Ineficácia contra microrganismos patogênicos: não elimina vírus, bactérias e protozoários, exigindo métodos complementares de desinfecção.
- Competição por adsorção: substâncias orgânicas de baixo peso molecular pode reduzir a eficiência do processo.
- Custos e manutenção elevados: a regeneração ou substituição periódica do material pode aumentar os custos operacionais.

Neste sentido, a ozonização apresenta vantagens significativas sobre os métodos convencionais, tais como:

- Maior poder oxidante: elimina uma ampla gama de patógenos, incluindo vírus, bactérias e protozoários resistentes ao cloro.
- Baixa formação de subprodutos tóxicos: embora aldeídos e ácidos carboxílicos possam ser gerados, sua toxicidade é menor do que a dos THMs e AHAs formados na cloração.
- Eficiência na remoção de contaminantes emergentes: atua na degradação de resíduos farmacêuticos, pesticidas e compostos orgânicos persistentes.
- Redução do uso de produtos químicos: minimiza a necessidade de coagulantes e desinfetantes adicionais.

No entanto, o processo de ozonização possui desafios, como o alto custo inicial e o consumo energético da geração de ozônio. Ainda assim, considerando sua alta eficiência e os benefícios ambientais, a ozonização se destaca como uma alternativa sustentável e segura para o abastecimento de água.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi estabelecido os procedimentos metodológicos para a coleta de dados e interpretação dos resultados, detalhando as características situacionais apresentadas.

O Marco Teórico se caracterizou por ser bibliográfico, pois foi realizado com base em materiais publicados em periódicos e websites na internet, e que foram disponibilizados ao público em geral. A Pesquisa Bibliográfica serviu de fundamentação teórica para aprofundar o conhecimento referente ao tema proposto.

O método experimental foi conduzido no município de Itajaí/SC, nas instalações da empresa Kairós Comércio de Purificadores de Água Ltda. O experimento teve como objetivo avaliar a eficácia e a sustentabilidade do sistema de tratamento de água por desinfecção com ozônio. A abordagem experimental permitiu a identificação das variáveis que influenciam o objeto de estudo, bem como a definição de formas de controle e observação dos efeitos das variáveis.

Os materiais utilizados na implantação do sistema de produção de ozônio foram selecionados de forma a evitar incompatibilidades e minimizar custos adicionais ao processo. O sistema de desinfecção de água passa por diversos estágios, incluindo captação e tratamento até a liberação da água desinfetada, atendendo às exigências da Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde.

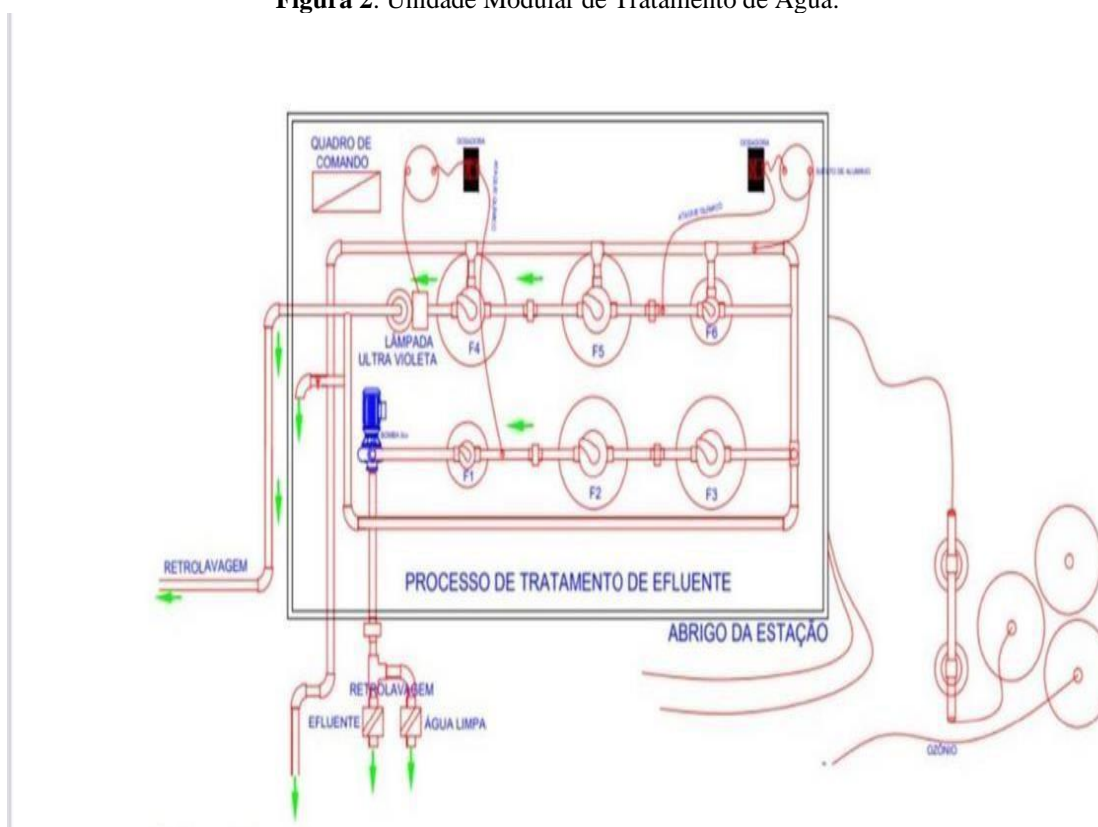
Os componentes utilizados no sistema foram: 1 gabinete metálico para posicionamento dos filtros; 1 gerador de ozônio; 1 caixa de 500 litros; 3 bombonas de 320 litros; tubos e conexões

em PVC; 1 bomba autoescovante de 1 CV; 6 vasos de fibras de vidro com válvulas; 2 dosadoras; 1 painel de automação.

Os insumos utilizados para o tratamento foram: cloro sanitário, cal, zeólita, carvão ativado.

A desinfecção da água foi realizada por meio da ozonização, um processo que envolve a oxidação e a desinfecção do efluente contaminado no rio Itajaí. O processo foi conduzido no mês de dezembro de 2023, utilizando uma Unidade Modular de Tratamento de Água (Figura 2)

Figura 2. Unidade Modular de Tratamento de Água.



Fonte: Kairós Coml.de Purificadores de Água, 2023

A aplicação do O_3 na água ocorreu na câmara de contato, utilizando uma válvula de Venturi, que dispersa o gás em pequenas bolhas, aumentando a eficiência da transferência do ozônio para o fluxo de água. A Unidade de Tratamento operou com uma capacidade de 1.000 L/h, necessitando de um processo de retrolavagem a cada 12 horas, com duração de 30 minutos.

Para avaliar a qualidade da água tratada, foram realizadas análises laboratoriais dos seguintes parâmetros:

- Físico-químicos: cor, turbidez, condutividade elétrica, temperatura, pH, alcalinidade e dureza total;
- Microbiológicos: coliformes totais, coliformes termotolerantes e bactérias mesófilas

aeróbias. A eficiência do processo foi avaliada por meio de ensaios laboratoriais que mediram a redução da carga microbiológica e físico-química do efluente tratado. Para isso, foram analisadas amostras de água antes e após a ozonização, comparando-se os resultados obtidos com os padrões estabelecidos pela legislação vigente.

As variáveis monitoradas incluíram a concentração residual de ozônio na água, o tempo de contato do gás com o efluente, o pH, a temperatura e a turbidez. Ensaio microbiológicos foram conduzidos para quantificar a redução de *Escherichia coli*, *Salmonella*, estreptococos de origem fecal e *Mycobacterium spp.* A eficiência da inativação microbiana foi determinada pela taxa de redução de microrganismos viáveis, expressa em unidades formadoras de colônia (UFC/100mL).

Os dados experimentais foram comparados com estudos prévios sobre ozonização, a fim de verificar a eficácia do sistema em condições similares. A metodologia incluiu replicações dos ensaios para garantir a reprodutibilidade dos resultados. Os parâmetros físico-químicos e microbiológicos foram avaliados conforme os protocolos estabelecidos pelas normas técnicas e ambientais aplicáveis.

A análise estatística dos dados foi realizada para identificar a significância das variações nos parâmetros analisados, assegurando a confiabilidade das conclusões sobre a eficiência do tratamento por ozonização.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DO SISTEMA DE OZONIZAÇÃO

Para o projeto do empreendimento de tratamento da água por ozonização em Itajaí/SC, levou-se em consideração a necessidade de garantir um efluente apropriado para a realização de processo de tratamento por filtração, de acordo com os níveis de tratamento.

A expressão “Nível de Tratamento” refere-se às etapas e tipo de substâncias ou elementos que se pretende remover do efluente líquido. Os níveis de tratamento são:

1. Oxidação com ozônio no efluente do esgoto bruto – O efluente coletado recebe uma dosagem inicial de ozônio para eliminar substâncias estranhas que não deveriam estar presentes. A remoção dessas impurezas antes da entrada no sistema de tratamento garante maior eficiência no processo subsequente;
2. Filtragem primária – O efluente passa por uma primeira filtragem para remoção de sólidos brutos, reduzindo a carga de impurezas em suspensão;
3. Filtragem secundária – Nesta etapa, ocorre uma segunda filtragem para retirada de partículas suspensas que ainda permanecem no efluente, garantindo maior clareza da água tratada;

4. Filtragem final e nova oxidação por ozônio – O efluente recebe uma última filtração, conhecida como polimento, e é submetido a outra oxidação com ozônio para eliminação de metais pesados e outros contaminantes;
5. Água tratada para reuso – Como resultado final, a água tratada pode ser reutilizada ou lançada em corpos d'água, conforme os parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA.

4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os ensaios laboratoriais demonstraram que a eficiência do sistema de ozonização na remoção de contaminantes foi satisfatória. A análise dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos antes e após o tratamento indicou reduções significativas nos níveis de turbidez, sólidos suspensos e carga microbiológica.

Os resultados demonstraram:

- Redução de turbidez: O sistema conseguiu reduzir a turbidez média do efluente em aproximadamente 95%, garantindo uma água visualmente mais limpa e transparente.
- Eliminação de carga microbiológica: Testes microbiológicos mostraram que a ozonização eliminou 99,99% das colônias de *Escherichia coli* e *Salmonella*, comprovando a eficácia do tratamento.
- Redução de metais pesados: O processo de polimento final permitiu a remoção de metais como ferro e manganês, garantindo que os padrões de qualidade fossem atendidos.

Os resultados obtidos corroboram estudos prévios que indicam a alta eficiência da ozonização na desinfecção e remoção de contaminantes da água. A comparação com pesquisas anteriores (Botelho Da Silva et al., 2011; Gerrity et al., 2017; Li et al., 2017) confirma que a ozonização é uma alternativa viável e sustentável ao uso de cloro, pois proporciona um tratamento eficiente sem a formação de subprodutos tóxicos.

Além disso, a implementação do sistema modular mostrou-se uma solução flexível e escalável, permitindo sua adaptação para diferentes demandas de tratamento. A necessidade de manutenção periódica, como a retrolavagem dos filtros e a reposição de insumos, foi um fator crítico identificado durante o processo, indicando a importância de um monitoramento contínuo para garantir o desempenho do sistema.

Dessa forma, a aplicação da ozonização no tratamento de efluentes demonstrou-se eficaz, sustentável e alinhada às regulamentações ambientais vigentes. A tecnologia apresenta potencial

para ser amplamente aplicada em sistemas de reuso de água, contribuindo para a preservação dos recursos hídricos e a sustentabilidade ambiental.

4.2.1 Captação do efluente bruto

O efluente bruto utilizado para os ensaios foi proveniente do rio Itajaí Mirim, captado diretamente da rede do SEMASA por meio de uma mangueira. Essa condução permitiu o direcionamento da água até um reservatório com capacidade de 1.000 litros, onde se iniciou o processo de tratamento.

4.2.2 Processo de Filtração e Desinfecção

Após a etapa de filtração, a água apresentou parâmetros de cor e turbidez dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos. No entanto, ainda poderia conter microrganismos potencialmente patogênicos. Para garantir a segurança da distribuição e evitar a disseminação de doenças, foi realizada a desinfecção utilizando ozônio. A Figura 4 ilustra a diferença entre a água bruta do rio Itajaí Mirim e a água ozonizada.

Figura 4. Água bruta do rio Itajaí e Água Ozonizada



Fonte: Kairós Comércio de Purificadores de Água Ltda

4.2.3 Vantagens da Ozonização

Comparado ao uso de cloro, o ozônio apresenta vantagens significativas, sendo aproximadamente 100 vezes mais solúvel em água e altamente eficiente na inativação de bactérias e microrganismos. Além de sua alta eficácia e rapidez na desinfecção, o ozônio não gera subprodutos indesejáveis e pode ser produzido diretamente na unidade de tratamento. Caso não seja consumido, ele se decompõe naturalmente em oxigênio, reduzindo impactos ambientais.

Além de sua ação desinfetante, a aplicação de ozônio contribui para a remoção de substâncias inorgânicas, como ferro e manganês, melhora a eficiência dos processos de coagulação e floculação

e favorece a degradação de compostos orgânicos não biodegradáveis. Dessa forma, a ozonização representa uma solução eficaz e sustentável para o tratamento de água.

4.2.4 Início do processo de retenção de sólidos

O efluente entra em três bombonas de 320 litros para a retenção de sólidos provenientes da água, sendo que uma das bombonas contém areia para filtração.

4.2.5 Sistema de filtração com zeólita para reter o material suspenso

Durante o processo de filtração, o efluente passa por duas bombonas para a retenção de material suspenso. Na terceira bombona, o efluente, já em estado límpido, é submetido à aplicação de nanotecnologia em formato de bolhas com ozônio, visando a remoção de metais pesados.

4.2.6 Filtração – Polimento

A etapa de polimento do efluente corresponde à última fase de filtração, complementada por um processo de oxidação por ozônio, visando a remoção de metais pesados. A filtração, um método físico essencial no tratamento de águas residuais, utiliza um meio poroso para a separação de partículas sólidas, garantindo a clarificação do efluente. O polimento é fundamental para eliminar impurezas residuais após os processos primários e secundários de tratamento.

A oxidação por ozônio desempenha um papel relevante na transformação de metais pesados solúveis em formas insolúveis, permitindo sua remoção por processos subsequentes de filtração. Esse mecanismo é eficaz na remoção de elementos como ferro, manganês, chumbo e outros metais potencialmente tóxicos, que representam riscos à saúde humana. Além disso, a utilização do ozônio contribui para a redução da carga orgânica e microbiológica, melhorando a qualidade final da água tratada.

4.2.7 Saída do efluente tratado

A purificação da água por ozonização consistiu na injeção controlada de ozônio, visando a eliminação de microrganismos, a oxidação de compostos orgânicos e a melhoria geral da qualidade da água. Esse processo resultou em significativa melhora nas características físico- químicas do efluente, incluindo redução da coloração, minimização de odores indesejáveis e aperfeiçoamento do sabor da água.

A combinação dos processos de filtração e oxidação por ozônio pode proporcionar um efluente de alta qualidade, potencialmente seguro para o consumo humano, dependendo das

condições de tratamento e da adesão às normativas vigentes. No entanto, a eficácia desse sistema está diretamente relacionada à operação e manutenção adequadas das unidades de tratamento, garantindo um desempenho sustentável e consistente. Além disso, é essencial considerar os impactos ambientais e atender às regulamentações locais para assegurar a viabilidade e conformidade do processo de tratamento adotado.

4.3 ANÁLISES REALIZADAS

Os parâmetros escolhidos para a análise físico-química do efluente incluíram Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), cloretos, fósforo total, nitrogênio total, sólidos suspensos, sólidos voláteis, sólidos totais, sólidos fixos, pH, carbono orgânico total e turbidez. O objetivo desta análise foi caracterizar a qualidade do efluente tratado e avaliar as alterações decorrentes da aplicação de ozônio em diferentes tempos de exposição.

Na primeira etapa das análises, realizou-se a caracterização inicial do efluente coletado na estação de tratamento. Foram conduzidas análises de pH, turbidez, cor aparente, DQO, alcalinidade, cloretos, ferro, manganês, alumínio, cloro e coliformes termotolerantes. Esta etapa visou obter um diagnóstico preliminar da composição e qualidade do efluente antes da aplicação do tratamento.

Na segunda etapa, as mesmas análises foram repetidas após a exposição do efluente ao tratamento com ozônio por diferentes períodos: 15, 30 e 60 minutos. Essa abordagem permitiu avaliar a eficácia da ozonização na redução de contaminantes e melhoria da qualidade do efluente.

As análises foram conduzidas pelo corpo técnico do Serviço Municipal de Água, Saneamento Básico e Infraestrutura (SEMASA), o qual emitiu relatórios técnicos contendo os resultados obtidos. O Quadro 1 apresenta os principais parâmetros monitorados e seus respectivos valores.

Quadro 1. Laudo técnico de controle e de vigilância da qualidade da água



Rua Heitor Liberato 1189 - Vila Operária
88303-101 - Itajaí - Santa Catarina
Fone: 0800 645 0195 - 47 3344-8000
www.semasa.itajai.com.br

DATA	HORA	TIPO	pH	COR APARENTE (uC)	TURBIDEZ (NTU)	DQO (PPM)	ALCALINIDADE (PPM)	CLORETOS (PPM)	FLUORETO (PPM)	FERRO (PPM)	MANGANÊS (PPM)	ALUMÍNIO (PPM)	CLORO LIVRE (PPM)
20/11/2023	16:45	BRUTA	7,95	66,5	9,91	29,0	47,0	20,0	-	-	0,00	-	-
20/11/2023	17:00	TRATADA	6,23	14,0	4,91	11,0	52,0	75,0	-	-	0,00	-	-
21/11/2023	13:00	BRUTA	7,30	65,9	13,80	24,0	45,0	60,0	-	> 3,00	0,20	-	-
21/11/2023	15:45	TRATADA	7,80	7,8	2,95	14,0	188,5	125,0	-	0,01	0,00	-	-
23/11/2023	15:10	RETROLAVAGEM	6,54	7,7	9,20	2,0	30,0	20,0	0,06	2,77	0,00	-	-
01/12/2023	13:30	BRUTA	6,95	-	1598,00	111,0	24,0	20,0	-	3,00	0,00	-	-
01/12/2023	13:30	TRATADA	7,10	4,7	0,56	5,0	28,0	25,0	-	2,46	0,00	-	-
01/12/2023	17:30	BRUTA	6,84	354,0	747,00	32,0	24,0	25,0	-	2,94	0,00	-	-
01/12/2023	17:30	TRATADA	6,88	5,5	0,73	0,0	27,0	25,0	-	0,02	0,01	0,01	-
02/12/2023	09:00	BRUTA	6,76	197,0	236,00	20,0	22,0	20,0	-	2,95	0,00	-	-
02/12/2023	09:00	TRATADA	6,55	5,0	0,80	2,0	32,0	25,0	-	0,01	0,20	0,00	-
05/12/2023	10:00	BRUTA	7,07	207,0	238,00	7,0	29,0	20,0	-	> 3,00	0,00	-	-
05/12/2023	10:00	TRATADA	6,81	7,5	2,11	0,0	32,0	30,0	-	0,01	0,00	0,00	1,19
06/12/2023	15:00	BRUTA	7,33	108,0	170,00	0,0	30,0	25,0	-	2,46	0,00	-	-
06/12/2023	15:00	TRATADA	7,07	7,9	1,22	0,0	38,0	20,0	-	0,02	0,30	0	-
07/12/2023	14:00	BRUTA	7,75	56,7	32,30	3,0	30,0	30,0	-	1,25	0,00	-	-
07/12/2023	14:00	TRATADA	7,25	7,3	1,08	0,0	34,0	25,0	-	0,02	0,00	0,037	-

José Adriano Kielling
Eng.º Químico

Itajaí, 09 de dezembro de 2023

Fonte: Laudo Técnico – SEMASA, Itajaí, 2023

Os resultados obtidos serão discutidos nas próximas seções, com a análise comparativa dos parâmetros antes e após o tratamento com ozônio, a fim de avaliar sua eficiência e impactos na qualidade do efluente tratado.

4.4 CENÁRIO ATUAL DO USO DO OZÔNIO NA DESINFECÇÃO E PURIFICAÇÃO DA ÁGUA

O ozônio tem sido amplamente utilizado na desinfecção e purificação da água devido à sua alta capacidade oxidante, sendo eficiente na remoção de microrganismos patogênicos e na degradação de compostos orgânicos. A dosagem ótima de ozônio depende diretamente da qualidade da água bruta e do objetivo da aplicação, uma vez que seu consumo está relacionado à concentração de matéria orgânica e à presença de organismos patogênicos, como os coliformes fecais e totais.

Em estações de tratamento de água, a dosagem de ozônio varia em função da concentração de matéria orgânica presente na água a ser tratada. Valores usuais recomendados para a aplicação de ozônio na água estão na faixa de 1,0 a 5,0 mg O₃/L. Essa variação busca garantir a eficiência do processo de desinfecção, mantendo um equilíbrio entre o consumo do agente oxidante e a qualidade final da água tratada.

A adoção do ozônio como agente desinfetante apresenta vantagens significativas em relação a outros processos convencionais, como a cloração, pois não gera subprodutos potencialmente nocivos, como os trihalometanos. Além disso, o ozônio é eficaz na degradação de pesticidas, compostos farmacêuticos e outros poluentes emergentes, tornando-se uma alternativa promissora para o aprimoramento dos sistemas de tratamento de água potável e residuária.

Apesar de seus benefícios, o uso do ozônio ainda enfrenta desafios, como os custos operacionais e a necessidade de sistemas de geração e controle bem dimensionados para garantir sua eficácia e segurança. Dessa forma, a viabilidade da aplicação do ozônio em larga escala depende de um balanço entre custo-benefício e as condições específicas de cada sistema de tratamento de água.

4.4.1 Dosagem do uso do Ozônio

A dosagem ideal de ozônio em estações de tratamento de água (ETA) depende diretamente da qualidade da água bruta e do objetivo da aplicação. O consumo de ozônio é influenciado pelo teor de matéria orgânica e pela quantidade de organismos patogênicos presentes na água, como os coliformes fecais e totais. Assim, a determinação da dosagem adequada deve levar em consideração esses fatores para garantir uma eficácia otimizada no tratamento da água.

Em ETAs, a concentração de ozônio aplicado na água pode variar entre 1,0 e 5,0 mg O₃/L, sendo esses valores comumente recomendados na literatura técnica. Essa variação está relacionada à quantidade de matéria orgânica presente na água a ser tratada, uma vez que o ozônio atua como agente oxidante, decompondo compostos orgânicos e inativando microrganismos patogênicos.

Quando o ozônio é empregado na etapa de desinfecção, a Portaria 2914/2011 estabelece que deve ser observado o produto CxT, que corresponde ao produto da concentração de ozônio (mg/L) pelo tempo de contato (em minutos) na câmara de desinfecção (tanque de contato). Para uma temperatura média da água de 15,0 °C, esse valor deve ser de até 0,38 mg/L.min, conforme determinado pela equação a seguir:

$$\text{Fator}_{CT} = C \times T$$

Equação 1

Onde,

CT é o fator, em mg/L.min;

C é a concentração de ozônio aplicada, em mg/L; e

T é o tempo de contato no tanque, em minutos.

Vale destacar que a temperatura da água influencia diretamente o valor de CxT. Para temperaturas abaixo de 15 °C, recomenda-se duplicar o valor de CxT a cada decréscimo de 10 °C. Por outro lado, para temperaturas acima de 15 °C, o valor de CxT deve ser reduzido pela metade a cada acréscimo de 10 °C. Essa correção é essencial para garantir a eficácia da desinfecção e a segurança do tratamento da água.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou uma análise detalhada sobre a aplicação do ozônio na desinfecção de efluentes no município de Itajaí/SC, destacando sua eficácia na remoção de contaminantes. A partir da revisão do cenário atual da qualidade da água e dos processos de tratamento, constatou-se que o esgoto e a água passam por etapas preliminares, como a remoção de materiais sólidos e detritos grosseiros, seguidas por processos biológicos e físico-químicos destinados à eliminação de compostos orgânicos, nutrientes e microrganismos patogênicos.

O município de Itajaí adota a ozonização como tecnologia de tratamento de efluentes, diferenciando-se das abordagens convencionais. A crescente preocupação com a qualidade da água impulsiona a busca por métodos inovadores e sustentáveis, nos quais o ozônio (O₃) se destaca devido às suas propriedades oxidativas e desinfetantes. Sua aplicação configura-se como uma alternativa eficiente e ecologicamente adequada, uma vez que se decompõe rapidamente sem a formação de subprodutos nocivos, como os trihalometanos gerados pelo uso do cloro. Além disso,

estudos indicam que o ozônio apresenta maior eficácia biocida, tornando-se uma opção viável para melhorar a segurança sanitária e ambiental no tratamento de efluentes. A qualidade da água é um fator determinante para a saúde pública e para a preservação ambiental. A adoção de tecnologias como a ozonização pode contribuir significativamente para a redução de impactos negativos associados a métodos tradicionais de desinfecção. Entretanto, é essencial a realização de estudos complementares para avaliar de forma abrangente a eficiência, os custos operacionais e os possíveis impactos ambientais dessa abordagem.

Diante dos achados deste estudo, conclui-se que o uso do ozônio na desinfecção de efluentes representa uma alternativa promissora e sustentável. No entanto, a ampliação do conhecimento sobre essa tecnologia requer a continuidade de pesquisas que aprofundem sua aplicabilidade em diferentes contextos, considerando aspectos técnicos, econômicos e regulatórios. Dessa forma, a integração de conhecimentos nas áreas de microbiologia, engenharia química e ambiental pode contribuir significativamente para o aprimoramento das práticas de tratamento de efluentes, promovendo soluções mais eficazes e sustentáveis para a gestão dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- ACT CARBON. Benefícios do carvão ativado no tratamento de água. Disponível em: https://www.actcarbon.com/beneficios-do-carvao-ativado-no-tratamento-deagua/?utm_source=chatgpt.com Acesso em: 15.jan.2025.
- AGRIAMBI. Caroline C. de S. Coelho¹, Otniel Freitas-Silva, Rodrigo da S. Campos³, Valeria S. Bezerra⁴ & Lourdes M. C. Cabral. Ozonização como tecnologia pós-colheita na conservação de frutas e hortaliças: uma revisão. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**.v19, n4, p.369-375. 2015. Campina Grande, PB, UAEA/UFCG.
- ALMEIDA, Edna; ASSALIN, Márcia Regina; ROSA, Maria Aparecida; DURAN, Nelson. **Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio**. Departamento de Físico-Química, Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, CP 6154, 13084-971 Campinas – SP, 2004. Núcleo de Ciências Ambientais, Universidade de Mogi das Cruzes, Mogi das Cruzes/SP
- AMIRA Mahmoud *et.al*. **Métodos emergentes para aumentar a eficiência do ozônio no tratamento de águas contaminadas**. Departamento de Química Fundamental, Instituto de Química, Universidade de São Paulo CP 26077, 05513-970 São Paulo SP, Brasil. Centro de Capacitação e Pesquisa em Meio Ambiente, Cubatão - SP, Brasil.
- BRASIL, Ministério da Saúde. **Programa Nacional de Vigilância da Qualidade da Água. Vigiagua**, 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/ptbr/composicao/seidigi/demas/situacao-de-saude/vigiagua> Acesso em: 12 jan.2025.
- _____.Ministério da Saúde. Portaria GM/MS 888, de 4 de maio de 2021. **Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html Acesso em 12.jan.2025.
- BOTELHO DA SILVA, S. *et al*. **Potencialidades do uso do ozônio no processamento de alimentos**. Semina: Ciências Agrárias, v. 32, n. 2, 2011. ISSN 1676-546X.
- COSTA, E. A.; NASCIMENTO, G. P.; VASCONCELOS, A. C. Desinfecção da Água por Radiação UV: Eficiência e Aplicabilidade. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 2, p. 341-349, 2018.
- DIAPER, E. Desinfection of water and wastewater using ozone. In: (Ed.). Desinfection; water and wastewater: **Ann Arbor Science**, 1975. p.211-31. ISBN 0250400421.
- FACHIN, Odília. **Fundamentos de Metodologia Científica: noções básicas em pesquisa científica**. 6 ed. São Paulo: Saraiva, 2018.
- GERRITY, D.; ROSARIO-ORTIZ, F. L.; WERT, E. C. **Application of ozone in water and wastewater treatment. Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: Fundamentals and Applications**, p. 123, 2017. ISSN 1780407181.

GRANDO, Taiana Vieira. Os recursos hídricos e os planos diretores municipais na Bacia do Rio Itajaí-Açu [dissertação] / Taiana Vieira Grando. Florianópolis, SC, 2011. 205 p.

JOHNSON, J. D. Disinfection--water and Wastewater. Ann Arbor Science Publishers, 1975. ISBN 0250400421.

MAHMOUD, Amira. SANCHES, Renato Freire. **Métodos emergentes para aumentar a eficiência do ozônio no tratamento de águas contaminadas.** Química Nova. v 30 n. 1, p. 198-205, 2007.

MY OZONE. **A história do ozônio a primeira aplicação em escala técnica do gás de ozônio.** <http://myozone.com.br/historia-do-ozonio-a-primeira-aplicacao-em-escala-tecnico-do-gas-ozonio/>. Acesso em: 27.jan.2024.

MPAM. Ministério Público do Estado do Amazonas. **Resolução COMDEMA 131/2006. Regulamentação dos empreendimentos multifamiliares residenciais e comerciais.** Disponível em: <https://www.mpam.mp.br/> Acesso: 12.12.2023.

MPF. Ministério Público Federal. **Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Disponível em: <https://www.mpf.mp.br/atuacaotematica/ccr4/dados-da-atuacao/projetos/qualidade-da-agua/legislacao/portarias/portaria-no2914-de-12-de-dezembro-de-2011> Acesso: 12.12.2023.

NEUTEGEM, Kamilla. Acota Vieira von. **Estudo comparativo entre métodos de desinfecção por cloro e por ozônio em estações de tratamento de água, com foco na degradação de desreguladores endócrinos.** IBICT. Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. Trabalho de Conclusão de Curso Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Química. Curso de Química Industrial, 2018.

NIKOLAOU, A.; LEKKAS, T.; GOLFINOPOULOS, S. Kinetics of the formation and decomposition of chlorination by-products in surface waters. **Chemical Engineering Journal**, v. 100, n. 1, p. 139-148, 2004. ISSN 1385-8947.

NOVA ÉPOCA. **As vantagens da ozonização no tratamento de efluentes**, 2022. Disponível em: <https://novaepoca.com/artigos/as-vantagens-da-ozonizacao-no-tratamento-de-efluentes> Acesso: 12.12.2023.

PANDISELVAM, R. et al. Application and Kinetics of Ozone in Food Preservation. **Ozone: Science & Engineering**, v. 39, n. 2, p. 115-126, 2017/03/04 2017. ISSN 0191-9512. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01919512.2016.1268947> Acesso: 11.12.2024.

PANOZON. **Vantagens e desvantagens do tratamento de ozônio na água.** 2021. Disponível em: <https://panozon.com.br/vantagens-e-desvantagens-do-tratamento-de-ozoniona-agua> Acesso: 11.12.2023.

PHLOZON. **Principais características da molécula e ozônio.** Disponível em: https://phlozon.com.br/caracteristicas-da-molecula-de-ozonio/?utm_source=chatgpt.com Acesso: 12.01.2025.

PORTAL DE TRATAMENTO DE ÁGUA. **Biotecnologia no tratamento de água**. Disponível em: <https://tratamentodeagua.com.br/> Acesso em: 12.12.2024.

RECKHOW, D. A. *et al.* Formation and occurrence of disinfection byproducts. *Water Research*, v. 50, p. 313-340, 2014.

REIFF, F. M.; WITT, V. M. **Guías para la selección y aplicación de tecnologías de desinfección del agua para consumo humano en pueblos pequeños y comunidades rurales en América Latina y el Caribe**. In: (Ed.). OPS série técnica: OPS, v.30, 2017.

SANTOS, A. B.; *et al.* Processos oxidativos avançados na remoção de contaminantes emergentes em águas e efluentes: uma revisão. *Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, n. 3, p. 521-538, 2020.

SCHNELL K, COLLIER S, DERADO G, et al: **Giardiasis in the United States - an epidemiologic and geospatial analysis of county-level drinking water and sanitation data, 1993-2016**. J Water Health 14(2):267–279, 2016.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do Trabalho Científico**. São Paulo, SP: Cortez, 2007.

SNATURAL, M. A. **Ozônio – Tratamento e Desinfecção da Água com Ozônio**. 2017. Disponível em: <http://www.snatural.com.br/ozonio-tratamento-agua-desinfeccao/>. Acesso em: 12.12.2023.

TRANSVERSO. **Estação de Tratamento de Água**. Disponível em: <https://transverso.com.br/estacao-de-tratamento-de-agua-eta/> Acesso: 12.12.2023.

WYSOK, B.; URADZIŃSKI, J.; GOMÓKA-PAWLICHKA, M. Ozone as an alternative disinfectant — A review. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, v.15, n.1, p.3-8, 2006.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

YIN, R. K. **Pesquisa de estudo de caso, desenho e métodos (métodos de pesquisa social aplicada)**. Mil Carvalhos. Califórnia: Sage Publications.2009

ZARPELLON, A.; RODRIGUES, E. M. Trihalometanos na água de consumo humano. *Revista Técnica da Sanepar*, v. 17, n. 17, p. 21-30, 2002.