



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Ambiental
Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

Italo César Rosa Mol

A redução do oxigênio dissolvido em amostras de água tratadas por plasma não-térmico

Ouro Preto

2024

Italo César Rosa Mol

A redução do oxigênio dissolvido em amostras de água tratadas por plasma não-térmico

Trabalho Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Ouro Preto.

Área de concentração: Saneamento Ambiental

Orientador: Prof^a. Dra. Marina de Medeiros Machado

Co-orientador: Me. Glívia Braga Faria

Ouro Preto

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M717a Mol, Italo Cesar Rosa.

A redução do oxigênio dissolvido em amostras de água tratada por plasma não-térmico. [manuscrito] / Italo Cesar Rosa Mol. - 2024.
36 f.: il.: color., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Marina de Medeiros Machado.

Coorientadora: Ma. Glívia Braga Faria.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Saúde ambiental. 2. Água - Purificação. 3. Plasma (Gases ionizados). 4. Oxigênio dissolvido. 5. Oxidação. I. Machado, Marina de Medeiros. II. Faria, Glívia Braga. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 502

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ítalo César Rosa Mol

A redução do oxigênio dissolvido em amostras de água tratada por plasma não-térmico

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental

Aprovada em 02 de março de 2024

Membros da banca

Profa. Dra. Marina de Medeiros Machado - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Msc. Glívia Braga Faria - Coorientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago - Universidade Federal de Ouro Preto
Msc. Isabela da Silva Pedro Rochinha - Universidade Federal de Ouro Preto

Marina de Medeiros Machado, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 02/03/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Marina de Medeiros Machado, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/03/2024, às 15:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0687215** e o código CRC **EDE8AA30**.

“I’ll steal all the oxygen!”

(Swans)

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio à pesquisa científica nacional; ao Programa de Educação Tutorial (PET), pelo fomento ao longo de toda a minha graduação; à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), pela estrutura e diligência oferecidas; ao Laboratório de Saneamento Ambiental da UFOP, pelo acolhimento.

Aos amigos e professores próximos do curso de Engenharia Ambiental da UFOP, todos indispensáveis para a minha formação. Aos amigos do PET Engenharia Ambiental e do Laboratório de Plasma da UFOP, pela inestimável parceria.

Aos queridos professores Marina e Aníbal, por me iniciarem na vida de pesquisador.

Aos familiares, aos quais devo mais do que posso pagar.

À indefectível Maria Clara, pelo apoio quando mais precisei.

RESUMO

A crescente preocupação com a qualidade da água impulsiona a pesquisa em tecnologias avançadas de tratamento de água e águas residuárias, tais como os processos oxidativos avançados (POAs). Este trabalho visou investigar a hipótese de que a aplicação de plasma não-térmico (PNT) em água é capaz de reduzir a concentração de oxigênio dissolvido (OD). Para tal, foi realizada uma revisão bibliográfica para investigar a relação entre o OD e os POAs, analisando teoricamente a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs) e revisando artigos científicos que correlacionam empiricamente a concentração de OD na água tratada por POAs. Uma discussão crítica de dados experimentais obtidos sobre o consumo de OD pelo PNT de argônio foi embasada na revisão bibliográfica. A hipótese se confirmou pela demonstração da imprescindibilidade teórica do OD na formação de EROs em POAs, bem como por evidências empíricas da correlação entre a concentração de OD, a eficiência desses processos quanto à degradação de contaminantes e a formação de EROs em água. Contudo, há de se considerar que estas evidências empíricas confirmatórias não são unânimes e indisputadas, pois há registro de efeitos contrários. Na discussão crítica, foi constatada a redução significativa do OD em amostras tratadas por PNT de argônio, o que faz do trabalho discutido mais uma fonte de evidências empíricas para a confirmação da hipótese inicial. Com a confirmação da hipótese, um novo direcionamento para a abordagem do PNT como alternativa de tratamento de água foi estabelecido, uma vez que sua aplicação pode levar à redução significativa de uma variável química fundamental para a avaliação da viabilidade ambiental do tratamento proposto.

Palavras-chaves: tratamento de água; processos oxidativos avançados; plasma não-térmico; oxigênio dissolvido.

ABSTRACT

The growing concern about water quality drives research into advanced treatment technologies, such as advanced oxidation processes (AOPs). This study aimed to investigate the hypothesis that the application of non-thermal plasma (NTP) in water is capable of reducing the concentration of dissolved oxygen (DO). To do so, a literature review was conducted to investigate the relationship between DO and AOPs, theoretically analyzing the formation of reactive oxygen species (ROS), and reviewing scientific articles that experimentally correlate DO concentration in water treated by AOPs. A critical discussion of results obtained regarding the consumption of DO by argon NTP was based on the literature review. The hypothesis was confirmed by demonstrating the theoretical indispensability of DO in the formation of ROS in AOPs, as well as by empirical evidence of the correlation between DO concentration, the efficiency of these processes, and the formation of ROS in water. However, it must be considered that this confirmatory empirical evidence is not unanimous and indisputable, as there are records of contrary effects. In the critical discussion, a significant reduction in DO was observed in samples treated by argon NTP, which further serves as empirical evidence to confirm the initial hypothesis. With the confirmation of the hypothesis, a new direction for the approach of NTP as a water treatment alternative was established, raising the possibility of further studies on the relationships between NTP and DO concentration.

Keywords: water treatment; advanced oxidation processes; non-thermal plasma; dissolved oxygen.

Sumário

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 OBJETIVO GERAL.....	10
2.1 Objetivos Específicos.....	10
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	11
3.1 Saneamento e água.....	11
3.2 O oxigênio dissolvido (OD) como um parâmetro de controle da qualidade da água...	11
3.3 Processos oxidativos avançados (POAs).....	12
3.4 Tecnologia de plasma.....	14
3.5 Tratamento de água por plasma.....	14
4 METODOLOGIA.....	16
4.1 Importância do OD na formação de espécies reativas de oxigênio e análise da relação do OD com os processos oxidativos avançados.....	16
4.2 Discussão da redução do OD com aplicação de PNT na água.....	17
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	18
5.1 A importância teórica do OD nos POAs.....	18
5.2 Análise do comportamento do OD em diferentes POAs.....	20
5.3 Relação do consumo de OD pela aplicação de PNT na água.....	24
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a qualidade da água e a necessidade de desenvolver tecnologias eficazes para seu tratamento têm impulsionado a pesquisa em processos oxidativos avançados (POAs) (HOFMAN-CARIS & HOFMAN, 2019). Entre esses processos, destaca-se o uso de plasma não-térmico, que tem sido reconhecido como uma alternativa promissora para a degradação de poluentes orgânicos em água (MURUGESAN *et al.*, 2020). Os POAs baseiam-se na formação de espécies reativas de oxigênio (EROs), tais como peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radical hidroxila ($OH\bullet$), oxigênio singlete (1O_2) e íon superóxido (O_2^-), que desempenham um papel fundamental na degradação de contaminantes orgânicos. Essas espécies reativas têm o oxigênio dissolvido na água como precursor para sua formação, o que explica o grande poder de oxidação e possibilita a degradação dos poluentes presentes (CHAKMA, DAS & MOHOLKAR, 2015; HORNE *et al.*, 2020).

O plasma não-térmico (PNT), por sua vez, é reconhecido como um POA eficaz devido à sua capacidade de gerar uma grande quantidade de EROs sem elevar significativamente a temperatura da água (SAEED *et al.*, 2022). Esse processo envolve a ionização parcial ou total de um gás, gerando um ambiente composto por elétrons, fótons e íons juntamente com moléculas neutras (FRIDMAN, 2008). Essas espécies reativas formadas no plasma são altamente reativas e podem oxidar eficientemente uma ampla gama de contaminantes orgânicos (MURUGESAN *et al.*, 2021).

Faria (2024) implementou o PNT para a desinfecção de água, analisando a sobrevivência de *Escherichia coli* após o tratamento e medindo alguns parâmetros químicos das amostras, como o oxigênio dissolvido (OD). Os resultados demonstraram que, para o PNT de argônio, houve uma redução significativa no OD das amostras. Esses achados levantam a hipótese de que a aplicação de PNT na água pode estar associada ao consumo de OD, o que poderia esclarecer aspectos operacionais da tecnologia. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo investigar esta hipótese sob uma perspectiva teórica, por meio de uma revisão da literatura científica, e promover uma discussão detalhada dos resultados obtidos por Faria (2024).

2 OBJETIVO GERAL

Investigar a hipótese de que a aplicação do plasma não-térmico em água contribui para a diminuição do oxigênio dissolvido.

2.1 Objetivos Específicos

- Demonstrar teoricamente como o oxigênio dissolvido (OD) influencia a formação de espécies reativas de oxigênio (EROs) nos processos oxidativos avançados (POAs);
- Analisar evidências empíricas da literatura que abordem a relação entre os POAs, especialmente o plasma não térmico (PNT), e a diminuição do OD na água;
- Discutir criticamente os resultados experimentais de Faria (2024) que demonstram a redução do OD causada pela aplicação do PNT em água.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Saneamento e água

A água é um recurso indispensável para a vida humana e desempenha um papel essencial em praticamente todas as áreas da sociedade, desde a agricultura e a indústria até a saúde pública e o consumo humano direto. No entanto, a disponibilidade de água potável de qualidade está se tornando cada vez mais escassa devido à poluição, urbanização descontrolada, alterações climáticas e outras atividades humanas, de modo que cerca de dois bilhões de pessoas no planeta enfrentam situações de estresse hídrico (UNESCO, 2021).

Diante dessa realidade, o tratamento de efluentes residuais e de água se torna uma necessidade imperativa para garantir o acesso a água limpa e segura para o consumo humano e outras atividades. O ciclo das técnicas convencionais de tratamento de água envolve as operações de coagulação, floculação, decantação, filtração e desinfecção (LIBÂNIO, 2010). O ciclo do tratamento de esgotos é semelhante, embora seja focado na remoção de matéria orgânica de efluentes antes do seu lançamento em corpos hídricos. Quando necessário, é implementada a etapa de tratamento terciário, cujo objetivo é remover contaminantes específicos que podem não ter sido completamente removidos pelos métodos convencionais, como micropoluentes, nutrientes, compostos orgânicos persistentes e patógenos resistentes (VON SPERLING, 2011). Este tipo de tratamento utiliza tecnologias avançadas, como filtração por membrana, adsorção, oxidação avançada e processos de remoção química.

3.2 O oxigênio dissolvido (OD) como um parâmetro de controle da qualidade da água

O parâmetro oxigênio dissolvido (OD) é uma variável que indica a quantidade de oxigênio presente na água, dissolvido em forma molecular (O_2). Essa variável é de extrema importância na análise da qualidade da água, pois o OD é essencial para a respiração de organismos aquáticos, como peixes, plantas aquáticas e microrganismos. Esses organismos dependem do oxigênio para realizar processos metabólicos vitais, como a respiração celular, que é responsável pela liberação de energia a partir da oxidação de compostos orgânicos (ESTEVES, 1998).

Além disso, o OD desempenha um papel crucial na decomposição de matéria orgânica, ajudando a manter o equilíbrio ecológico dos corpos d'água. Quando há uma quantidade adequada de oxigênio dissolvido na água, os processos de decomposição ocorrem de forma

eficiente, evitando a acumulação excessiva de material orgânico e a consequente redução da qualidade da água (CUNHA & CALIJURI, 2013). Por outro lado, níveis baixos de OD podem levar à hipóxia, uma condição em que há deficiência de oxigênio na água. Isso pode resultar na morte de organismos aquáticos e na degradação da qualidade da água, levando a problemas como a eutrofização e a formação de zonas mortas (ESTEVES, 1998).

No Brasil, a Resolução CONAMA 357/2005 destaca a importância do monitoramento do oxigênio dissolvido (OD) em corpos hídricos, enfatizando a sua relevância para o cumprimento de padrões ambientais (BRASIL, 2005). A resolução define os níveis mínimos de concentração de OD para diferentes classes de corpos d'água, de acordo com a sua finalidade de uso. Por exemplo, para corpos d'água de Classe 1 (destinados ao abastecimento público após tratamento convencional), a CONAMA 357/2005 estabelece que a concentração de OD deve ser igual ou superior a 5 mg/L, para garantir a qualidade da água tratada e sua adequação para consumo humano; já para corpos d'água de Classe 2 (com finalidade de proteção das comunidades aquáticas e recreação de contato primário), a concentração de OD deve ser igual ou superior a 4 mg/L e assim por diante, proporcionalmente às demais classes.

Portanto, a avaliação do OD em projetos de pesquisa sobre tratamento de água é essencial não apenas para garantir a qualidade ambiental e a saúde dos ecossistemas aquáticos, mas também para assegurar que os corpos d'água atendam às normas e padrões estabelecidos para diversos usos. A monitoração regular do OD permite identificar e mitigar problemas potenciais, como a hipoxia e a eutrofização, antes que estes impactem significativamente a fauna e flora aquáticas e a qualidade da água para consumo e recreação.

3.3 Processos oxidativos avançados (POAs)

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) baseiam-se na transferência eletrônica entre espécies doadoras (espécies reativas de oxigênio (EROs)) e substâncias receptoras (contaminantes), causando a alteração química destas (LIU & ADEWUYI, 2016). Assim, os POAs têm sido amplamente estudados para o tratamento de água potável e efluentes industriais devido à sua capacidade de gerar espécies oxidantes que são capazes de degradar uma variedade de poluentes orgânicos (SORLINI, 2019). Resultantes da combinação de diversos oxidantes, radiações e catalisadores, os POAs incluem uma variedade de EROs, tais como ozônio (O_3), peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radical hidroxila ($OH\bullet$), que podem ser mais ou menos seletivas quanto aos contaminantes-alvo (HILLES *et al.*, 2019). A TAB. 1 apresenta algumas das principais EROs e seus respectivos potenciais de oxidação.

Tabela 1: Potencial de oxidação de EROs comuns em POAs.

Oxidante		Potencial de oxidação (V)
Fórmula química		
Radical hidroxila	$\text{OH}\cdot$	2,8
Radical sulfato	$\text{SO}_4\cdot^-$	2,6
Ozônio	O_3	2,1
Ânion persulfato	$\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$	2,1
Peróxido de hidrogênio	H_2O_2	1,8
Íon permanganato	MnO_4^-	1,7
Peroximonosulfato	HSO_5^-	1,4

Fonte: HILLES *et al.* (2019).

Os POAs incluem diferentes técnicas de produção de radicais, tais como radiação ultravioleta (UV), radiação ultravioleta de vácuo (VUV), radiação ionizante, uma variada gama compostos químicos catalisadores e outras, aumentando sua versatilidade e permitindo uma melhor adequação aos requisitos específicos de tratamento (ZHAI *et al.*, 2022). Esta versatilidade fica ainda mais evidente quando as técnicas são combinadas a fim de se aumentar a eficiência dos tratamentos. Por exemplo, existem tratamentos que combinam soluções de peróxido de hidrogênio e luz ultravioleta ($\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$), soluções de ozônio e luz ultravioleta (O_3/UV) (GRAUMANS *et al.*, 2021), emissão luminosa e reações de Fenton (produção de H_2O_2 a partir das interações entre espécies de ferro e a água) (foto-Fenton) (JU *et al.*, 2022), emissão de radiação gama, emissão de microondas (GAYATHRI, YESODHAM & YESODHAM, 2019) e diversas outras combinações. Isso os torna uma ferramenta valiosa para enfrentar problemas de poluição e resolver desafios ambientais complexos.

3.4 Tecnologia de plasma

Plasma é o estado da matéria caracterizado pela ionização de um gás, o que significa que pelo menos um elétron no sistema está desvinculado de um átomo ou molécula, resultando em íons e elétrons livres (FRIDMAN, 2008). As cargas elétricas livres conferem ao plasma alta responsividade a campos eletromagnéticos, bem como condutividade elétrica significativa, às vezes maior do que a de materiais como ouro e cobre (BITTENCOURT, 2014).

Os plasmas se dividem em duas grandes categorias: o plasma térmico ou quente e o plasma não-térmico (PNT) ou frio. Estas categorias distinguem-se pela ausência de equilíbrio termodinâmico entre as partículas de diferentes tamanhos, nomeadamente, os elétrons e as partículas maiores — os átomos e as moléculas. Se o gás está em um estado de ionização ou de quase ionização, significa que alta energia foi aportada ao sistema; energia essa que é primeiramente captada pelos elétrons (SHRIVER & ATKINS, 2008). Desta forma, os elétrons, em um sistema plasmático, possuem alta temperatura. Quando a temperatura dos elétrons se equipara à temperatura das partículas maiores, o gás ionizado tem sua temperatura significativamente elevada em relação à temperatura ambiente e assim é formado o plasma térmico. Quando a temperatura das partículas maiores permanece muito menor do que a temperatura dos elétrons, a temperatura do gás ionizado se mantém semelhante à temperatura ambiente e obtém-se o PNT (FRIDMAN, 2008).

3.5 Tratamento de água por plasma

Devido à sua reatividade, o PNT figura como um processo oxidativo avançado para o tratamento de água e efluentes, pois seu contato com a água leva à formação de EROs (FRIDMAN, 2008). Uma das vantagens significativas do plasma não-térmico reside em sua segurança e natureza ambientalmente segura por conta da não-geração de subprodutos químicos (MURUGESAN *et al.*, 2021). A operação dos reatores de plasma não-térmico é regida por uma série de variáveis, incluindo a distância entre os eletrodos, o tipo de gás de trabalho utilizado e a fonte de alimentação. A otimização dessas variáveis é essencial para garantir a eficácia e a funcionalidade adequada dos sistemas de plasma não-térmico (RIPENKO *et al.*, 2020).

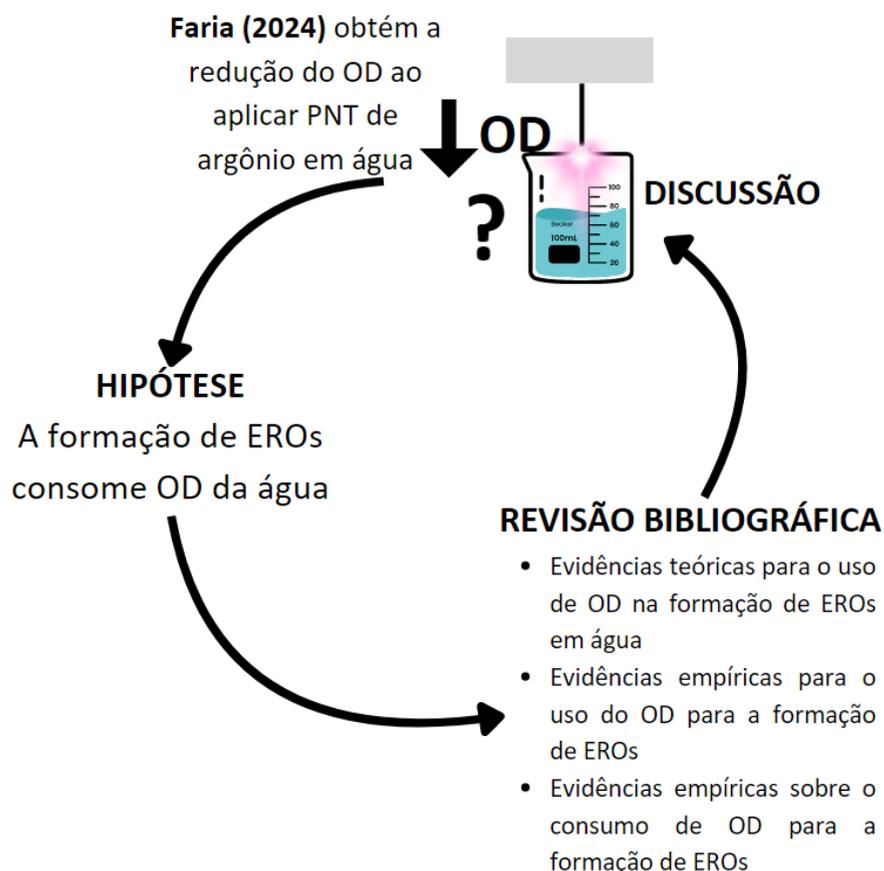
As aplicações das tecnologias do PNT ao tratamento de água e efluentes são vastas e diversificadas, abrangendo desde a desinfecção de água para a sua potabilização (PATANGE *et al.*, 2018) até a remoção de poluentes orgânicos persistentes (AROLA *et al.*, 2017). Não

obstante à sua aplicação direta para a degradação de poluentes em meio aquoso, o PNT também tem sido usado em consonância com outros POAs (GRAUMANS *et al.*, 2021).

4 METODOLOGIA

Este trabalho visa investigar a hipótese de que a aplicação do PNT em água é capaz de contribuir para a redução da concentração de OD, suscitada pelos resultados obtidos por Faria (2024). Para isto, foi empenhada uma revisão bibliográfica para elucidar os mecanismos de interação entre os POAs e o OD, principalmente nos mecanismos que levam ao seu consumo. A revisão bibliográfica pôde embasar uma nova discussão crítica dos resultados obtidos por Faria (2024) quanto ao comportamento do OD em seus experimentos. A FIG. 1 demonstra esquematicamente o procedimento metodológico deste estudo.

Figura 1: Esquema gráfico da metodologia.



Fonte: elaboração própria.

4.1 Importância do OD na formação de espécies reativas de oxigênio e análise da relação do OD com os processos oxidativos avançados

Para demonstrar a importância do OD nos diferentes POAs, foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de se obter informações teóricas sobre a formação de EROs na água. A revisão foi empenhada por meio da leitura dos livros e artigos científicos especializados em

POAs. O enfoque da revisão foi catalogar os principais EROs nos tratamentos de água por POAs, bem como elucidar os mecanismos químicos da sua formação e a relação entre esses mecanismos e o OD da água.

Para a investigação das evidências empíricas relacionadas à interação entre POAs e OD, foram catalogados artigos científicos e livros que, de alguma forma, correlacionaram experimentalmente a concentração de OD na água tratada por POAs com os métodos de oxidação utilizados, seja na quantificação da eficiência do tratamento, ou na quantificação das EROs formadas. Para isto, foram realizadas pesquisas das *strings* “*reactive oxygen species*” AND “*water treatment*”, “*advanced oxidation process*” AND “*dissolved oxygen*”, “*non-thermal plasma*” AND “*dissolved oxygen*” e “*cold plasma*” AND “*dissolved oxygen*” nas bases de dados *Science Direct* e *Springer Link*. As obras utilizadas estão listados nas referências bibliográficas deste trabalho.

4.2 Discussão da redução do OD com aplicação de PNT na água

A discussão dos resultados obtidos por Faria (2024) em relação ao consumo de OD obtido na aplicação do PNT de argônio em água foi realizada pelo confronto dos dados apresentados pela autora com a hipótese enunciada anteriormente e sustentada pela revisão bibliográfica realizada.

A fim de consolidar a pertinência dos resultados, foi realizado um Teste t de Student de dados emparelhados para a comparação das concentrações de OD obtidas no estudo. O teste foi realizado pela formulação da hipótese de que as médias das concentrações não se alteraram com o tratamento por PNT e o cálculo do fator t (Equação 1). Em comparação com a distribuição probabilística de Student, pôde-se decidir pela aceitação ou rejeição da hipótese.

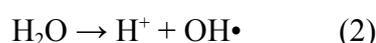
$$t = \frac{d - \mu d}{sd/\sqrt{n}} \quad (1)$$

onde d = média das diferenças entre as concentrações obtidas; μd = diferença entre as médias das concentrações obtidas; sd = desvio padrão da amostra das diferenças; n = tamanho da amostra.

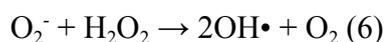
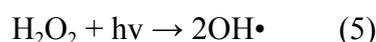
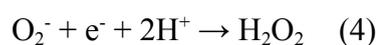
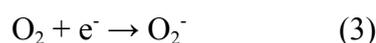
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 A importância teórica do OD nos POAs

O oxigênio dissolvido (OD) desempenha um papel fundamental na eficiência dos POAs aplicados no tratamento de água, pois atua diretamente na formação e estabilidade das Espécies Reativas de Oxigênio (EROs). Em particular, o OD é necessário para a formação de radicais hidroxila ($\text{OH}\cdot$), que são considerados os principais agentes oxidantes responsáveis pela degradação dos poluentes orgânicos (WOLS & HOFMAN-CARIS, 2012; SORLINI, 2019). A hidroxila pode ser formada via hidrólise direta (Equação 2)



ou pela formação de compostos intermediários dependentes da presença de OD,



onde o elétron responsável pela excitação do oxigênio molecular (Equação 2) provém da atividade catalítica iniciada por algum método de oxidação avançada.

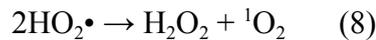
O segundo mecanismo de formação de $\text{OH}\cdot$ (Equações 3 a 6) recebe mais destaque quando se leva em conta a possibilidade de inibição em matrizes aquosas complexas, pois, sendo um oxidante mais forte, a hidroxila é mais suscetível à inibição por matéria orgânica dissolvida, metais dissolvidos, etc (BRAME *et al.*, 2014). Gerar EROs intermediárias pode garantir, portanto, a eficiência oxidativa do processo. Deve-se destacar a formação do íon superóxido (Equação 3) que pode levar à formação de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) por acoplamento (Equação 4) ou à formação de radical hidroperoxila pela reação com um próton H^+ (Equação 7) (FOTIOU *et al.*, 2016), bem como atuar como um oxidante por si mesmo (GAO *et al.*, 2021; XIA *et al.*, 2022).



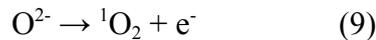
O H_2O_2 é uma das principais espécies reativas nos POA, uma vez que pode degradar contaminantes via reação ácido-base, oxidação direta (XIA *et al.*, 2022) e/ou oxidação

indireta, via decomposição e formação de $\text{OH}\cdot$ (Equação 6) (FOTIOU *et al.*, 2016); possibilidade que coloca o H_2O_2 como um fotocatalisador para tratamentos com luz UV (IBRAHIM & SOLPAN (2019).

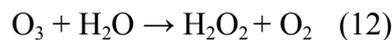
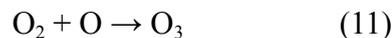
Inclusive, em presença de radiação UV, o peróxido de hidrogênio pode ser decomposto para formar radicais hidroperoxila (MOUELE *et al.*, 2021). O radical hidroperoxila, por sua vez, além de ser um oxidante direto de contaminantes (HORNE *et al.*, 2020), também possibilita a formação de H_2O_2 por dismutação (Equação 8) (KRUK, 2013).



Ainda, a oxidação do íon superóxido leva à formação do oxigênio singlete (${}^1\text{O}_2$), uma forma energeticamente rica do oxigênio molecular (KRUK, 2013). O oxigênio singlete é muito importante para os POAs por ser uma espécie altamente seletiva para alguns contaminantes (GAO *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2020; CHEN, WANG & HOU, 2021).



O ozônio (O_3) é outra espécie reativa de oxigênio muito visada nos POAs devido à sua estabilidade e alto poder reativo (GUO *et al.*, 2021). O ciclo de sua formação pode se iniciar pela excitação e decomposição do oxigênio molecular em oxigênio atômico, de modo análogo ao visto na Equação 2 (MOUELE *et al.*, 2021). As Equações 10-12 mostram um ciclo possível do ozônio, desde a decomposição do oxigênio molecular pela absorção de energia luminosa até a recombinação do ozônio em peróxido de hidrogênio (ZILLI *et al.*, 2021).



Outra atuação importante do OD ocorre nos processos denominados de auto oxidação. A auto oxidação é o processo de formação de radicais peroxila pela oxidação de um “iniciador” (R) pelo oxigênio molecular (Equação 13).



A formação do radical hidroperoxila visto na Equação 7 é um tipo de auto oxidação, embora a formação de radicais por este processo não necessite exclusivamente do oxigênio em seu estado singlete de excitação (KRUK, 2013). Naturalmente, os radicais peroxila são espécies oxidativas de contaminantes, principalmente contra fenóis (KOVACS *et al.*, 2016), bem como estágios intermediários de outras EROs.

5.2 Análise do comportamento do OD em diferentes POAs

Portanto, pode-se acreditar que o OD influencia a eficiência dos POAs, uma vez que a presença de oxigênio molecular é indispensável, quimicamente, para a formação de diversas EROs. Buscando embasar esta afirmação com evidências empíricas, diversos estudos correlacionando a concentração de OD e a eficiência de POAs foram empenhados nos últimos anos.

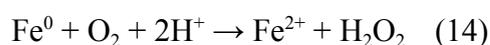
Pelaez *et al.* (2011) obtiveram menores taxas de degradação da toxina microcistina-LR quando a concentração de OD de suas amostras foi limitada pela inserção de gás N₂. Kribeche *et al.* (2016) obtiveram resultados semelhantes para a degradação de fenuron: mais degradação do contaminante no sistema com aeração forçada do que no sistema com aeração livre e muito menor degradação no sistema borrifado com N₂. Estes autores ainda constataram a redução da concentração de OD durante a degradação do contaminante. Kovacs *et al.* (2016) obtiveram menor degradação de monuron em amostras borrifadas com N₂.

Zhang *et al.* (2018) constataram que a presença de OD na água fez decrescer consideravelmente a energia de ativação das reações de oxidação de diversos contaminantes por SO₄⁻ e, por outro lado, aumentar consideravelmente as constantes cinéticas das mesmas reações. Kask, Krichevskaya & Bolobajev (2019) obtiveram maiores cinéticas de degradação de metazacloro por tratamento sonolítico em amostras com maior concentração de OD. Wang *et al.* (2021) obtiveram as maiores taxas de degradação de tetrabromobisfenol A via oxidação por peroxidissulfato em amostras oxigenadas; mais do que isso, os autores constataram, por eletroscopia de ressonância magnética, que o OD foi a principal fonte de formação de ¹O₂.

De-Nasri e colaboradores (2022) realizaram experimentos específicos destinados a quantificar o efeito do OD na hidroxilação por cavitação. Estas experiências envolveram a

alteração da concentração de OD durante o tratamento e o monitoramento dos perfis de concentração correspondentes do contaminante. Os resultados destas experiências relacionam explicitamente a dependência do oxigênio dissolvido para a hidroxilação. Hou *et al.* (2023) perderam cerca de 50% de eficiência na degradação de sulfametoxazol por reações de Fenton catalisadas quando a amostra foi borrifada com N₂.

A importância do oxigênio molecular para as reações de Fenton é um fato bem exemplificado na literatura (MOON, PARK & PARK *et al.*, 2017), pois a reação fundamental segue como se mostra na Equação 14.



Resultados adversos para a presença do OD na aplicação dos POAs também são reportados na literatura. Obstando as constatações de Hou *et al.* (2023), Mashayekh-Salehi *et al.* (2021) concluíram pela não significância da concentração de OD nas reações de Fenton (com pirita) para degradação de tetraciclina em água. Os autores não perderam eficiência nas amostras borbulhadas com N₂ e a produção de OH• não foi prejudicada após o O₂ haver sido inibido com ferro adicionado nas amostras.

Muitos resultados semelhantes são encontrados em pesquisas envolvendo fotodegradação e processos de fotocatalise. É o caso do que foi estabelecido por Giri *et al.* (2012), que obtiveram efetiva perda de eficiência nas amostras ricas em OD para a fotólise de ácido perfluorooctanóico em água; estes autores foram seguidos por Pan *et al.* (2022), que obtiveram menores taxas de fotodegradação de cloroacetaldeído em água com maiores concentrações de OD; os autores argumentam que espécies redutivas como H⁺ e elétrons livres são fundamentais para o processo e estas são inibidas pelo oxigênio molecular.

Dai *et al.* (2022) constataram que a concentração de OD não influenciou consideravelmente na degradação de sulfametazol por ácido peracético ativado, embora a formação de EROs seja fundamental para o processo. O mesmo foi observado por Zhang *et al.* (2023). Em contrapartida, também em tratamentos por foto-emissão, Krakko *et al.* (2022) obtiveram maior degradação de tetraciclina na presença de maiores concentrações de OD. Ainda, Jo *et al.* (2023), aplicando fotocatalise com fosfeto de cobre, não obtiveram degradação de álcool furfurílico em amostras de água em condições anóxicas. Os autores

justificaram a presença do OD pela sua importância na geração de oxigênio singlete e $\text{OH}\cdot$ (Equações 3, 4 e 8).

Yang *et al.* (2018), monitorando a concentração de H_2O_2 em diferentes concentrações de OD em irradiação VUV/UV na água, concluíram que não houve correlação direta; os autores colocaram em dúvida a pertinência das Equações 6 e 7 para os processos fotocatalíticos. Yang *et al.* (2021), por sua vez, constataram o exato oposto: o aumento da concentração de OD fez aumentar consideravelmente a produção de H_2O_2 ; entretanto, estes autores não rejeitam o resultado dos seus predecessores, mas justificam a diferença dos resultados pela presença de íons de iodo, que reagem mais facilmente com o radical hidroxila e permitem a formação de peróxido de hidrogênio pelo ciclo visto nas Equações 5 e 6.

Contudo, Bustos *et al.* (2018), com um dos trabalhos mais robustos sobre a correlação entre a fotodegradação de contaminantes orgânicos em água e o papel do OD no processo, afirmam categoricamente a importância da variável no processo. Estes autores buscaram investigar as variáveis de influência na remoção de diclorvos por irradiação de luz solar simulada (UV-C) e compararam amostras ricas em OD com outras borrifadas com N_2 ; as primeiras demonstraram maior eficiência de tratamento.

Especificamente no âmbito do uso do PNT, poucos resultados experimentais são reportados no que diz respeito a correlacionar concentração de OD e eficiência de tratamento, embora o tema seja citado com caráter teórico nas revisões bibliográficas sobre o tema (PALMA, RICHARD & MINELLA, 2022). Em tratamento de PNT em fase líquida, Li *et al.* (2022) obtiveram maior produção de EROs nas amostras enriquecidas com oxigênio. Gao *et al.* (2022) advogam pelo uso do PNT em conjunto com um sistema de borbulhamento para gerar água ativada para o tratamento de diversos contaminantes em água, pois o acréscimo da concentração de OD gera mais radicais $\text{OH}\cdot$.

Luvita, Sugiarto & Bismo (2022) afirmaram o mesmo e, inclusive, ao monitorar a concentração de OD durante o tratamento com PNT e borbulhamento, constataram um ligeiro decréscimo; entretanto, os autores justificaram o resultado pelo incremento da temperatura, e não pelo consumo de OD para a formação de EROs. Em contrapartida, há o registro de Liu *et al.* (2010), que, utilizando plasma de descarga luminosa, obtiveram resultados satisfatórios tanto na geração de H_2O_2 quanto na consequente degradação do poluente orgânico em água mesmo com baixas concentrações de OD, o que levou os autores a concluir que o parâmetro não é fundamental para o tipo de tratamento que empenharam.

Outro fenômeno que indica empiricamente a presença do OD em POAs é o consumo do oxigênio molecular durante os tratamentos. Neste âmbito, poucos dados são apresentados na literatura. Além dos já citados Kribeche *et al.* (2016), Alkhurairji & Ajlouni (2017) obtiveram a redução da concentração de OD em maiores irradiações de raios gama, indicando o consumo do OD para a formação de EROs. Este resultado é corroborado por Solpan *et al.* (2022) que, aplicando irradiação gama catalizada por H₂O₂, obtiveram uma redução de mais de 30% da concentração de OD da amostra. Cabe inserir na discussão o aumento da demanda bioquímica de oxigênio obtida por Hashim *et al.* (2016) em amostras de água tratada por plasma não-térmico, resultado inesperado pelos autores e que pode se justificar pelo consumo de OD no processo.

Uma síntese desta revisão bibliográfica pode ser vista na TAB 2.

Tabela 2: Síntese da revisão bibliográfica; a coluna “Papel do OD no tratamento” demonstra qualitativamente o grau de contribuição do resultado para a confirmação da hipótese deste trabalho.

Trabalho	POA utilizado	Papel do OD no tratamento
Liu <i>et al.</i> (2010)	PNT	Insignificante
Pelaez <i>et al.</i> (2011)	TiO ₂	Fundamental para a viabilidade
Giri <i>et al.</i> (2012)	Luz UV	Redução da eficiência
Kribeche <i>et al.</i> (2016)	Foto-Fenton	Fundamental para a viabilidade
		Consumido na aplicação
Kovacs <i>et al.</i> (2016)	Radiação ionizante	Fundamental para a viabilidade
Hashim <i>et al.</i> (2017)	PNT	Consumido na aplicação
Zhang <i>et al.</i> (2018)	SO ₄ ⁻	Fundamental para a viabilidade
Yang <i>et al.</i> (2018)	Luz UV	Insignificante
Bustos <i>et al.</i> (2018)	Luz UV	Melhora da eficiência
Kask, Krichevskaya & Bolobajev (2019)	Sonólise	Melhora da eficiência
Wang <i>et al.</i> (2021)	Persulfato de amônia	Melhora da eficiência
		Maior geração de EROs
Mashayekh-Salehi <i>et al.</i> (2021)	Reação tipo-Fenton	Insignificante
Yang <i>et al.</i> (2021)	Luz UV	Maior geração de EROs
De Nasri <i>et al.</i> (2022)	Cavitação hidrodinâmica	Fundamental para a viabilidade
Trabalho	POA utilizado	Papel do OD no tratamento

Pan <i>et al.</i> (2022)	Luz UV	Redução da eficiência
Dai <i>et al.</i> (2022)	Ácido peracético ativado	Insignificante
Krakko <i>et al.</i> (2022)	Luz UV	Melhora da eficiência
Li <i>et al.</i> (2022)	PNT	Maior geração de EROs
Gao <i>et al.</i> (2022)	PNT + cavitação hidrodinâmica	Maior geração de EROs
Luvita, Sugiarto & Bismo (2022)	PNT + cavitação hidrodinâmica	Maior geração de EROs Consumido na aplicação
Solpan <i>et al.</i> (2022)	Radiação gama	Consumido na aplicação
Hou <i>et al.</i> (2023)	Reação tipo-Fenton catalisada	Fundamental para a viabilidade
Zhang <i>et al.</i> (2023)	Luz UV	Insignificante
Jo <i>et al.</i> (2023)	Luz visível	Fundamental para a viabilidade

Fonte: elaboração própria.

Portanto, pode-se dizer que a literatura científica corrobora a hipótese enunciada neste trabalho, uma vez que o OD é indispensável tanto para a formação de EROs quanto para a eficiência dos POAs, embora este último resultado não seja unânime entre os autores. De qualquer forma, a síntese apresentada na TAB. 2 demonstra que os trabalhos que correlacionam concentração de OD e eficiência de POAs são majoritariamente concordantes com a hipótese do presente estudo.

5.3 Relação do consumo de OD pela aplicação de PNT na água

Recentemente, a dissertação elaborada por Faria (2024) para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, envolveu o estudo experimental da concentração de OD correlacionada com a aplicação do PNT. A autora utilizou um reator do tipo descarga de corona em fase gasosa, com argônio (Ar) como gás de arraste. O objetivo principal daquele trabalho foi investigar a influência do PNT na inativação de *Escherichia coli* em água, portanto, todas as amostras utilizadas foram artificialmente contaminadas com a bactéria.

A autora estabeleceu três parâmetros operacionais para avaliar a influência do PNT na amostra: vazão de Ar, tensão aplicada e tempo. Além de quantificar a concentração bacteriana antes e após os tratamentos, Faria (2024) também aferiu pH, OD, condutividade e temperatura de cada amostra; neste trabalho, serão considerados apenas os valores de OD. O delineamento experimental pode ser visto na TAB. 3, bem como os valores de ODi (concentração de oxigênio dissolvido inicial — antes do tratamento por plasma) e ODf (concentração de oxigênio dissolvido final — após o tratamento por plasma).

Tabela 3: Delineamento experimental e resultados de Faria (2024).

Tratamento	Delineamento experimental			Resultados	
	Vazão de Ar (L/min)	Tensão de 17 kV	(% Tempo (min))	ODi (mg/L)	ODf (mg/L)
1	1	20	5	6,49	2,92
2	1	100	5	5,2	4,25
3	1	20	15	6,89	3,41
4	1	100	15	5,2	4,81
5	3	20	5	6,9	2,92
6	3	100	5	5,2	4,18
7	3	20	15	6,63	3,07
8	3	100	15	5,2	3,8
9	1	60	5	6,04	3,31
10	1	100	5	5,2	4,25
11	1	60	15	5,41	2,66
12	1	100	15	5,2	4,81
13	3	60	5	5,71	2,39
14	3	100	5	5,2	4,18
15	3	60	15	5,17	2,55
16	3	100	15	5,2	3,8

Fonte: Faria (2024).

A autora realizou análise de variância (ANOVA) para correlacionar os três parâmetros do reator com a alteração da concentração de OD. A primeira constatação da análise foi que a tensão aplicada possui um impacto significativo na concentração de OD. Gao *et al.* (2022) comentam que, para seus resultados, o parâmetro tensão aplicada é mais importante para a degradação do poluente estudado do que a vazão de gás. Para Luvita, Sugirarto & Bismo (2022), maior tensão aplicada significa maior geração de EROs, uma vez que os autores constataram uma relação direta entre o parâmetro operacional e a quantificação de O₃ e H₂O₂. Em tratamentos eletroquímicos de água, a relação entre energia elétrica aplicada e maior produção de EROs também é conhecida (THAMARAISELVAN *et al.*, 2021; SUN *et*

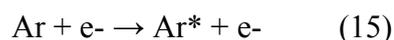
al., 2023). Adiciona-se a isto o resultado de que o único parâmetro operacional influente de modo significativo na inativação bacteriana foi a tensão aplicada. De fato, maior geração de EROs significa maior degradação de contaminantes em água; neste caso, a bactéria.

A análise estatística também evidenciou para autora que o tempo de tratamento também mostrou ser um fator estatisticamente significativo, com diferentes durações de tratamento afetando a concentração de OD na amostra tratada. Isso sugere que o tempo de exposição à descarga de plasma desempenha um papel crucial na formação e estabilidade das EROs. Quanto à correlação entre quantitativo de EROs e tempo de tratamento por PNT, pouco se registrou na literatura, a não ser pelo trabalho de Magureanu *et al.* (2016), que obtiveram uma correlação direta entre o quantitativo de H₂O₂ e tempo de tratamento por PNT.

Outro resultado fornecido pela análise da autora foi o de que a vazão de gás não influenciou diretamente na variação da concentração de OD. Não são conhecidos outros estudos que relacionem a quantidade de gás inserida no reator com a formação de EROs, além do supracitado Gao *et al.* (2022). Não obstante, o resultado permite questionar o levantamento hipotético feito pela autora:

“Esses resultados sugerem que o Ar pode estar contribuindo para uma redução do oxigênio dissolvido, possivelmente devido à reação do oxigênio disponível na água com as espécies reativas de argônio, formando assim espécies reativas secundárias que reduzem o OD” (FARIA, 2024).

Segundo Cubas *et al.* (2019), o argônio ionizado injetado no sistema plasmático se restringe em alterar as espécies químicas presentes no sistema, como nas Equações 15 e 16. De fato, considerando a inertibilidade do elemento argônio, pode-se crer que o aumento em volume por tempo da matéria gasosa não resultará diretamente em consumo de oxigênio molecular.



Voltando à hipótese de que a aplicação do PNT na água é capaz de reduzir a concentração de OD da mesma, os resultados de Faria (2024) são mais um testemunho experimental disto. Para confirmar esta contribuição, é possível realizar um simples teste estatístico de

comparação de médias relacionadas, desconsiderando a variação dos parâmetros operacionais do reator (TRIOLA, 2017).

Supondo a hipótese de que as médias de ODi e ODf são iguais, a realização do Teste t de Student a um nível de 5% de significância, nos permite rejeitá-la e concluir que o tratamento por PNT, de modo unívoco, alterou as concentrações de OD das amostras de água submetidas. Os valores podem ser vistos na TAB. 4.

Tabela 4: Teste de comparação entre as concentrações de OD obtidas por Faria (2024).

ODi	ODf	ODi - ODf	
6,49	2,92	3,57	
5,2	4,25	0,95	
6,89	3,41	3,48	
5,2	4,81	0,39	Teste t de Student α = 5%
6,9	2,92	3,98	Hipótese
5,2	4,18	1,02	MedODi = MedODf
6,63	3,07	3,56	t calculado
5,2	3,8	1,4	6,61
6,04	3,31	2,73	t crítico
5,2	4,25	0,95	1,75
5,41	2,66	2,75	p-valor
5,2	4,81	0,39	0,0000041
5,71	2,39	3,32	
5,2	4,18	1,02	
5,17	2,55	2,62	
5,2	3,8	1,4	

Fonte: elaboração própria.

O trabalho de Faria (2024) contribui para a confirmação da hipótese de que o PNT é capaz de efetivamente diminuir a concentração de OD da água, pois a diferença entre as

concentrações de OD de suas amostras antes e após o tratamento foi estatisticamente significativa. Ademais, a análise de variância correlacionando os parâmetros operacionais do reator coaduna com o reportado na literatura, que pressupõe os princípios da formação de EROs com base no oxigênio molecular dissolvido na água.

Entretanto, cabe a ressalva de que o trabalho analisado não teve como seu objetivo principal o estudo do OD, o que pode ter acarretado em imprecisões de medição por conta da presença de contaminantes, como a própria concentração bacteriana, ou a presença de matéria orgânica ou metais nas vidrarias, considerando que a limpeza por solução ácida ou calcinação não foi informada na metodologia do trabalho. Ainda, as limitações do presente estudo não permitem uma análise complemente exaustiva dos resultados de Faria (2024), uma vez que a presença específica da bactéria *Escherichia coli*, o volume de água utilizado, a pureza química das amostras e as condições do reator, como geometria e distância inter-eletrodos, podem ter influenciado nos valores obtidos de OD. De qualquer forma, certamente as variações obtidas para os valores pH, condutividade e temperatura correlacionam-se diretamente com a geração de EROs (KRUK, 2013) e, conseqüentemente, na concentração de OD. Não obstante, a consideração destas outras variáveis foge do escopo do presente trabalho.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho enunciou e investigou a hipótese de que a aplicação de plasma não-térmico (PNT) em água é capaz de reduzir a concentração de oxigênio dissolvido (OD). A hipótese pôde ser confirmada pela evidenciação de que o OD desempenha um papel fundamental nos processos oxidativos avançados (POAs) do ponto de vista teórico e empírico.

O OD é a matéria prima para a formação de outras espécies reativas de oxigênio (EROs), figurando no ciclo das reações de formação das principais EROs utilizadas em POAs, como o radical hidroxila, peróxido de hidrogênio e ozônio. Este papel do OD se inicia pela sua ativação em meio aquoso pela absorção de energia e sua consequente excitação em estados de maior nível energético ou em sua oxidação ao oxigênio superóxido. Diversas publicações da literatura científica pertinente confirmam a imprescindibilidade do OD para a eficiência de POAs e a formação de EROs, o que se demonstrou pela correlação entre OD e a quantificação da degradação de poluentes em água e/ou a concentração de EROs. Contudo, há de se considerar que estas evidências empíricas confirmatórias não são unânimes e indisputadas, pois há registro de efeitos contrários, o que enseja um futuro estudo mais aprofundado dos mecanismos químicos de funcionamento dos POAs.

Por fim, pôde-se discutir o trabalho de Faria (2024) e classificar seus resultados quanto ao comportamento da concentração de OD como mais uma confirmação experimental da hipótese formulada. O presente estudo pôde determinar estatisticamente que o tratamento por PNT de argônio, de modo geral, foi responsável pela redução significativa da concentração de OD. A autora demonstrou que as variáveis operacionais tensão aplicada e tempo de tratamento influenciam diretamente nesta redução. Entretanto, a não exaustão analítica do trabalho da autora deixa lacunas quanto à real influência de outras variáveis relacionadas à matriz aquosa sobre o OD. Isto coloca mais um argumento pela necessidade de se realizar estudos sobre o comportamento do OD em tratamentos de água por plasma.

Portanto, pode-se concluir que o presente trabalho oferece um novo direcionamento para a abordagem do PNT como alternativa de tratamento de água, uma vez que sua aplicação pode levar à redução significativa de uma variável química fundamental como o OD, necessário para a avaliação de viabilidade ambiental do tratamento proposto, bem como da sua adequabilidade às diferentes normativas relacionadas ao tema. Considerando a

importância desta enunciação, recomenda-se que novos estudos sejam realizados para o aprofundamento da compreensão das relações entre o plasma não-térmico e o oxigênio dissolvido da água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALKHURAJI, T. S.; AJLOUNI, A.-W. **Destruction of amphetamine in aqueous solution using gamma irradiation**. Radiation physics and chemistry (Oxford, England: 1993), v. 139, p. 17–21, 2017.
- AROLA, K. *et al.*. **Novel process concept alternatives for improved removal of micropollutants in wastewater treatment**. Separation and purification technology, v. 186, p. 333–341, 2017.
- BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of plasma physics**. Nova Iorque, NY, USA: Springer, 2014.
- BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 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. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 mar. 2005.
- BRAME, J. *et al.*. **Trading oxidation power for efficiency: differential inhibition of photo-generated hydroxyl radicals versus singlet oxygen**. Water research, v. 60, p. 259–266, 2014.
- BUSTOS, N. *et al.*. **Sunlight and UVC-254 irradiation induced photodegradation of organophosphorus pesticide dichlorvos in aqueous matrices**. The Science of the total environment, v. 649, p. 592–600, 2019.
- CHAKMA, S.; DAS, L.; MOHOLKAR, V. S. **Dye decolorization with hybrid advanced oxidation processes comprising sonolysis/Fenton-like/photo-ferrioxalate systems: A mechanistic investigation**. Separation and purification technology, v. 156, p. 596–607, 2015.
- CHEN, Y.-H.; WANG, B.-K.; HOU, W.-C. **Graphitic carbon nitride embedded with graphene materials towards photocatalysis of bisphenol A: The role of graphene and mediation of superoxide and singlet oxygen**. Chemosphere, v. 278, n. 130334, p. 130334, 2021.
- CUBAS, A. L. V. *et al.*. **Effect of chemical species generated by different geometries of air and argon non-thermal plasma reactors on bacteria inactivation in water**. Separation and purification technology, v. 222, p. 68–74, 2019.
- CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. DO C. **Sistemas aquáticos continentais**. Em: DO CARMO CALIJURI, M.; CUNHA, D. G. F. (Eds.). Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2013.

DAI, C. *et al.* **Mechanisms and product toxicity of activated carbon/peracetic acid for degradation of sulfamethoxazole:** implications for groundwater remediation. *Water research*, v. 216, n. 118347, p. 118347, 2022.

DE-NASRI, S. J. *et al.* **Quantifying OH radical generation in hydrodynamic cavitation via coumarin dosimetry:** Influence of operating parameters and cavitation devices. *Ultrasonics sonochemistry*, v. 90, n. 106207, p. 106207, 2022.

ESTEVEZ, F. de A. **Fundamentos de Limnologia.** Rio de Janeiro: Interciência. 2 Ed. 1998.

FARIA, G. B. **TRATAMENTO DE ÁGUA POR PLASMA NÃO-TÉRMICO PARA INATIVAÇÃO DE ESCHERICHIA COLI.** Mestrado em Engenharia Ambiental - Programa de Pós Graduação de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto. 151 f. 2024.

FOTIOU, T. *et al.* **Assessment of the roles of reactive oxygen species in the UV and visible light photocatalytic degradation of cyanotoxins and water taste and odor compounds using C-TiO₂.** *Water research*, v. 90, p. 52–61, 2016.

FRIDMAN, A. A. **Plasma Chemistry.** Cambridge, England: Cambridge University Press, 2008.

GAO, P. *et al.* **Promoted peroxymonosulfate activation into singlet oxygen over perovskite for ofloxacin degradation by controlling the oxygen defect concentration.** *Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*, v. 359, p. 828–839, 2019.

GAO, T. *et al.* **H₂O₂ inducing dissolved oxygen activation and electron donation of pollutants over Fe-ZnS quantum dots through surface electron-poor/rich microregion construction for water treatment.** *Journal of hazardous materials*, v. 420, n. 126579, p. 126579, 2021.

GAO, Y. *et al.* **Microbubble-enhanced water activation by cold plasma.** *Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*, v. 446, n. 137318, p. 137318, 2022.

GAYATHRI, P. V.; YESODHARAN, S.; YESODHARAN, E. P. **Microwave/Persulphate assisted ZnO mediated photocatalysis (MW/PS/UV/ZnO) as an efficient advanced oxidation process for the removal of RhB dye pollutant from water.** *Journal of environmental chemical engineering*, v. 7, n. 4, p. 103122, 2019.

GHERNAOUT, D.; NACEUR, M. W.; AOUABED, A. **On the dependence of chlorine by-products generated species formation of the electrode material and applied charge during electrochemical water treatment.** *Desalination*, v. 270, n. 1–3, p. 9–22, 2011.

GIRI, R. R. *et al.* **Factors influencing UV photodecomposition of perfluorooctanoic acid in water.** *Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*, v. 180, p. 197–203, 2012.

GUO, Y. *et al.* **Revisiting the role of reactive oxygen species for pollutant abatement during catalytic ozonation:** The probe approach versus the scavenger approach. *Applied catalysis. B, Environmental*, v. 280, n. 119418, p. 119418, 2021.

GRAUMANS, M. H. F. *et al.* **Thermal plasma activation and UV/H₂O₂ oxidative degradation of pharmaceutical residues.** *Environmental research*, v. 195, n. 110884, p. 110884, 2021.

HASHIM, S. A. *et al.* **Non-thermal plasma for air and water remediation.** *Archives of biochemistry and biophysics*, v. 605, p. 34–40, 2016.

HILLES, A. H. *et al.* **Advanced Oxidation Processes for Water and Wastewater Treatment: An Introduction.** Em: AZIZ, H. A.; ABU AMR, S. S. (Eds.). *Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Water and Wastewater Treatment.* Hershey, PA, USA: IGI Global, 2019. p. 49–69.

HOFMAN-CARIS, R.; HOFMAN, J. **Limitations of Conventional Drinking Water Technologies in Pollutant Removal.** Em: GIL, A.; GALEANO, L. A.; VICENTE, M. Á. (Eds.). *Applications of Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Drinking Water Treatment.* Suíça: Springer Nature, 2019. p. 53–68.

HORNE, G. P. *et al.* **Radiolytic degradation of formic acid and formate in aqueous solution: modeling the final stages of organic mineralization under advanced oxidation process conditions.** *Water research*, v. 186, n. 116314, p. 116314, 2020.

HOU, C. *et al.* **A single-atom Fe-N-C catalyst with superior Fenton-like reaction performance prepared facilely using microalgae: Key roles of oxygen and interactions between Fe-N_x and Fe/Fe compounds.** *Applied catalysis. B, Environmental*, v. 339, n. 123135, p. 123135, 2023.

IBRAHIM, A. K. E.; ŞOLPAN, D. **Removal of carbofuran in aqueous solution by using UV-irradiation/hydrogen peroxide.** *Journal of environmental chemical engineering*, v. 7, n. 1, p. 102820, 2019.

JO, S. *et al.* **Unraveling Janus-like behavior of copper phosphide for selective production of reactive oxygen species: Singlet oxygen versus hydroxyl radical.** *Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*, v. 470, n. 144389, p. 144389, 2023.

JU, Y. *et al.* **Solar-driven on-site H₂O₂ generation and tandem photo-Fenton reaction on a triphase interface for rapid organic pollutant degradation.** *Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland: 1996)*, v. 430, n. 133168, p. 133168, 2022.

KASK, M.; KRICHEVSKAYA, M.; BOLOBAJEV, J. **Sonolytic degradation of pesticide metazachlor in water: The role of dissolved oxygen and ferric sludge in the process intensification.** *Journal of environmental chemical engineering*, v. 7, n. 3, p. 103095, 2019.

KOVÁCS, K. *et al.* **Ionizing radiation induced degradation of monuron in dilute aqueous solution.** *Radiation physics and chemistry (Oxford, England: 1993)*, v. 124, p. 191–197, 2016.

KRAKKÓ, D. *et al.* **(V)UV degradation of the antibiotic tetracycline: Kinetics, transformation products and pathway.** Process safety and environmental protection: transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B, v. 163, p. 395–404, 2022.

KRIBÉCHE, M. E. A. *et al.* **Insight into photochemical oxidation of Fenuron in water using iron oxide and oxalate: The roles of the dissolved oxygen.** Journal of photochemistry and photobiology. A, Chemistry, v. 329, p. 120–129, 2016.

KRUK, I. **Environmental toxicology and chemistry of oxygen species.** Berlim, Germany: Springer, 2013.

LI, M. *et al.* **The roles of oxygen and chloride in the degradation efficiency and mechanism of Basic Violet 16 by liquid glow discharge plasma.** Separation and purification technology, v. 280, n. 119886, p. 119886, 2022.

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

LIU, Y. *et al.* **Aqueous 4-nitrophenol decomposition and hydrogen peroxide formation induced by contact glow discharge electrolysis.** Journal of hazardous materials, v. 181, n. 1–3, p. 1010–1015, 2010.

LIU, Y.; ADEWUYI, Y. G. **A review on removal of elemental mercury from flue gas using advanced oxidation process: Chemistry and process.** Chemical engineering research & design: transactions of the Institution of Chemical Engineers, v. 112, p. 199–250, 2016.

LUVITA, V.; SUGIARTO, A. T.; BISMO, S. **Characterization of dielectric barrier discharge reactor with nanobubble application for industrial water treatment and depollution.** South African journal of chemical engineering, v. 40, p. 246–257, 2022.

MAGUREANU, M. *et al.* **New evidence on the formation of oxidizing species in corona discharge in contact with liquid and their reactions with organic compounds.** Chemosphere, v. 165, p. 507–514, 2016.

MASHAYEKH-SALEHI, A. *et al.* **Use of mine waste for H₂O₂-assisted heterogeneous Fenton-like degradation of tetracycline by natural pyrite nanoparticles: Catalyst characterization, degradation mechanism, operational parameters and cytotoxicity assessment.** Journal of cleaner production, v. 291, n. 125235, p. 125235, 2021.

MOON, B.-H.; PARK, Y.-B.; PARK, K.-H. **Fenton oxidation of Orange II by pre-reduction using nanoscale zero-valent iron.** Desalination, v. 268, n. 1–3, p. 249–252, 2011.

MOUELE, E. S. M. *et al.* **A critical review on ozone and co-species, generation and reaction mechanisms in plasma induced by dielectric barrier discharge technologies for wastewater remediation.** Journal of environmental chemical engineering, v. 9, n. 5, p. 105758, 2021.

MURUGESAN, P. *et al.* **Water decontamination using non-thermal plasma: Concepts, applications, and prospects.** Journal of environmental chemical engineering, v. 8, n. 5, p. 104377, 2020.

PALMA, D.; RICHARD, C.; MINELLA, M. **State of the art and perspectives about non-thermal plasma applications for the removal of PFAS in water.** Chemical Engineering Journal Advances, v. 10, n. 100253, p. 100253, 2022.

PAN, H. *et al.* **Coexisting oxidation and reduction of chloroacetaldehydes in water by UV/VUV irradiation.** Water research, v. 214, n. 118192, p. 118192, 2022.

PATANGE, A. *et al.* **Assessment of the disinfection capacity and eco-toxicological impact of atmospheric cold plasma for treatment of food industry effluents.** The Science of the total environment, v. 631–632, p. 298–307, 2018.

PELAEZ, M. *et al.* **Effects of water parameters on the degradation of microcystin-LR under visible light-activated TiO₂ photocatalyst.** Water research, v. 45, n. 12, p. 3787–3796, 2011.

RIPENKO, V. S. *et al.* **Water treatment with the cold plasma of a diffuse nanosecond discharge in air at atmospheric pressure.** Russian physics journal, v. 63, n. 5, p. 818–823, 2020.

SHRIVER, D.; ATKINS, P. **Química Inorgânica.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

SORLINI, S. **Natural Organic Matter: Characterization and Removal by AOPs to Assist Drinking Water Facilities.** Em: GIL, A.; GALEANO, L. A.; VICENTE, M. Á. (Eds.). Applications of Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Drinking Water Treatment. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2019. p. 53–68.

SRIVASTAVA, V. *et al.* **Electro catalytic generation of reactive species at diamond electrodes and applications in microbial inactivation.** Current opinion in electrochemistry, v. 30, n. 100849, p. 100849, 2021.

TRIOLA, M. F. **Introdução à Estatística.** LTC. 12 Ed. 2017.

UNESCO. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre desenvolvimento dos recursos hídricos 2021: o valor da água; fatos e dados.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000375751_por>.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das águas e ao Tratamento de Esgotos.** 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

WANG, Q. *et al.* **Carbon nitride-based cuprous catalysts induced nonradical-led oxidation by peroxydisulfate: Role of cuprous and dissolved oxygen.** Chemical engineering journal (Lausanne, Switzerland: 1996), v. 419, n. 129667, p. 129667, 2021.

WOLS, B. A.; HOFMAN-CARIS, C. H. M. **Review of photochemical reaction constants of organic micropollutants required for UV advanced oxidation processes in water.** *Water research*, v. 46, n. 9, p. 2815–2827, 2012.

XIA, D. *et al.* **A modified flower pollen-based photothermocatalytic process for enhanced solar water disinfection: Photoelectric effect and bactericidal mechanisms.** *Water research*, v. 217, n. 118423, p. 118423, 2022.

YANG, L. *et al.* **A green method to determine VUV (185 nm) fluence rate based on hydrogen peroxide production in aqueous solution.** *Photochemistry and photobiology*, v. 94, n. 4, p. 821–824, 2018.

YANG, Y. *et al.* **Toward better understanding vacuum ultraviolet—iodide induced photolysis via hydrogen peroxide formation, iodine species change, and difluoroacetic acid degradation.** *Frontiers of environmental science & engineering*, v. 16, n. 5, 2022.

ZHAI, C. *et al.* **Recent progress on single-atom catalysts in advanced oxidation processes for water treatment.** *Environmental Functional Materials*, 2022.

ZHANG, J. *et al.* **Highly efficient reduction of bromate by vacuum UV/sulfite system.** *Chemosphere*, v. 349, p. 140875, 2023.

ZHANG, Q. *et al.* **Mechanism and performance of singlet oxygen dominated peroxymonosulfate activation on CoOOH nanoparticles for 2,4-dichlorophenol degradation in water.** *Journal of hazardous materials*, v. 384, n. 121350, p. 121350, 2020.

ZHANG, R. *et al.* **The impact of dissolved oxygen on sulfate radical-induced oxidation of organic micro-pollutants: A theoretical study.** *Water research*, v. 135, p. 144–154, 2018.

ZILLI, S. C. *et al.* **Toxicity of acrylamide after degradation by conjugated (UV/H₂O₂) photolysis in microalgae.** *Environmental science and pollution research international*, v. 28, n. 28, p. 38085–38093, 2021.