



## PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES: TENDÊNCIAS RECENTES E ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

ADVANCED OXIDATION PROCESSES IN WASTEWATER TREATMENT: RECENT TRENDS AND BIBLIOMETRIC ANALYSIS

PROCESOS OXIDATIVOS AVANZADOS EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES: TENDENCIAS RECIENTES Y ANÁLISIS BIBLIOMÉTRICO

**Victor Hugo de Oliveira Santiago<sup>1</sup>, Katherine Jisselle Flores Vasquez<sup>2</sup>, Marcio Cypriano de Lima<sup>3</sup>, Carla da Silva Meireles<sup>4</sup>, & George Ricardo Santana Andrade<sup>5\*</sup>**

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal do Espírito Santo <sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo <sup>3</sup> SEDU - Secretaria da Educação, Espírito Santo <sup>4</sup> Departamento de Ciências Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo

<sup>1</sup> [victor.santiago@edu.ufes.br](mailto:victor.santiago@edu.ufes.br) <sup>2</sup> [katherine.vasquez@edu.ufes.br](mailto:katherine.vasquez@edu.ufes.br) <sup>3</sup> [macioncy85@gmail.com](mailto:macioncy85@gmail.com) <sup>4</sup> [carla.meireles@ufes.br](mailto:carla.meireles@ufes.br)

<sup>5</sup> [george.andrade@ufes.br](mailto:george.andrade@ufes.br)

### ARTIGO INFO.

Recebido: 23.09.2024

Aprovado: 11.11.2024

Disponibilizado: 12.12.2024

**PALAVRAS-CHAVE:** Tratamento de efluentes; Processo Foto-Fenton; Fotocatálise.

**KEYWORDS:** Wastewater treatment; Photo-Fenton process; Photocatalysis.

**PALABRAS CLAVE:** Tratamiento de efluentes; Proceso Foto-Fenton; Fotocatálisis.

**\*Autor Correspondente:** Andrade, G. R. S.

### RESUMO

O descarte inadequado de efluentes industriais é um dos principais responsáveis pela liberação de substâncias tóxicas, quimicamente complexas e não biodegradáveis em corpos hídricos. Diante disso, os Processos Oxidativos Avançados (POAs), tecnologias responsáveis por oxidar poluentes através da geração de radicais oxigenados, têm ganhado destaque no tratamento de águas residuais por serem métodos considerados promissores, eficazes e inovadores. Neste trabalho, foi realizada uma análise bibliométrica na base de dados Web of Science com o objetivo de verificar a relevância e os avanços do tema em questão. Inicialmente, a estratégia de busca foi utilizar a palavra-chave "advanced oxidation processes" e, em seguida, adicionou-se a palavra "water treatment". A China foi o país com o maior número de publicações antes e após a inserção do segundo termo, e a área de pesquisa Engenharia configurou-se como a área de maior relevância. Após isso, foram acrescentados separadamente na busca diversos POAs juntamente com as duas palavras citadas anteriormente, com o intuito de determinar as técnicas mais relevantes, e as 3 técnicas que apresentaram os resultados mais expressivos foram analisadas, sendo elas Foto-Fenton, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV e fotocatálise heterogênea. Por fim, uma matriz SWOT foi elaborada contendo pontos positivos e negativos presentes em um grupo de artigos selecionados.

### ABSTRACT

The inadequate disposal of industrial effluents is one of the main causes of the release of toxic, chemically complex and non-biodegradable substances into water bodies. Therefore, Advanced Oxidative Processes (AOPs), technologies responsible for oxidizing pollutants through the generation of oxygenated radicals, have gained

prominence in wastewater treatment as they are considered promising, effective and innovative methods. In this work, a bibliometric analysis was carried out on the "Web of Science" database with the aim of verifying the relevance and advances of the topic in question. Initially, the search strategy was to use the keyword "advanced oxidation processes" and then the word "water treatment" was added. China was the country with the highest number of publications before and after the insertion of the second term and the Engineering research area was configured as an area of greater relevance. After that, it was added separately in the search for several POAs together with the two words mentioned above, with the aim of determining the most relevant techniques, where the 3 techniques that presented the most expressive results were highlighted, namely Foto-Fenton, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/ UV and heterogeneous photocatalysis. Finally, a SWOT matrix was created containing positive and negative points present in a group of selected articles.

### RESUMEN

La eliminación inadecuada de efluentes industriales es una de las principales causas de la liberación de sustancias tóxicas, químicamente complejas y no biodegradables a los cuerpos de agua. Por ello, los Procesos Oxidativos Avanzados (POAs), tecnologías encargadas de oxidar contaminantes mediante la generación de radicales oxigenados, han ganado protagonismo en el tratamiento de aguas residuales al ser métodos considerados prometedores, eficaces e innovadores. En este trabajo se realizó un análisis bibliométrico sobre la base de datos "Web of Science" con el objetivo de verificar la relevancia y avances del tema en cuestión. Inicialmente la estrategia de búsqueda fue utilizar la palabra clave "procesos de oxidación avanzados" y luego se agregó la palabra "tratamiento de agua". China fue el país con mayor número de publicaciones antes y después de la inserción del segundo semestre y el área de investigación en Ingeniería fue el área más relevante. Posteriormente se agregaron a la búsqueda varios POA por separado junto con las dos palabras mencionadas anteriormente, con el objetivo de determinar las técnicas más relevantes, donde se analizaron las 3 técnicas que presentaron resultados más expresivos, a saber, Foto-Fenton, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV. y fotocatálisis heterogénea. Finalmente, se creó una matriz FODA que contiene puntos positivos y negativos presentes en un grupo de artículos seleccionados.



## INTRODUÇÃO

A poluição aquática é caracterizada como um dos maiores desafios enfrentados atualmente pela sociedade. A má qualidade da água está diretamente relacionada a esse problema global, sendo as substâncias altamente tóxicas provenientes de indústrias e outras fontes não tratadas as principais responsáveis pela propagação desse distúrbio ambiental. O impacto no ecossistema aquático e no abastecimento doméstico de água devido à infiltração de compostos químicos no solo é imenso, destacando-se que os geradores responsáveis por essa poluição podem ter origem físico-química ou biológica (Saravanan et al., 2022). Como uma alternativa aos métodos convencionais utilizados para o tratamento de águas residuais, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) destacam-se por suas vantagens, incluindo alta eficiência de mineralização de poluentes emergentes e a não geração de contaminantes secundários (Preethi et al., 2024).

De acordo com o relatório mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento de recursos hídricos, publicado em 2023, as águas residuais são as principais responsáveis pela contaminação hídrica, impactando diretamente a saúde da população mundial e os ecossistemas do planeta (UNESCO, 2023). Além disso, estima-se que 80% das águas residuais geradas em todo o mundo e não tratadas acabarão em ambientes aquáticos. Uma pesquisa realizada em 2022 pela organização internacional CDP (Carbon Disclosure Project ou, traduzindo literalmente, Projeto de Divulgação de Carbono) reforça a estimativa apresentada anteriormente, uma vez que, entre todas as empresas pesquisadas, apenas 58% afirmaram monitorar a qualidade de suas águas residuais e somente 12% possuem metas de redução da poluição (CDP, 2022).

As estratégias industriais convencionais para tratamento de águas residuais podem ser classificadas em três grupos: tratamentos físicos (flotação, sedimentação, filtração, entre outros), químicos (coagulação-flocação, precipitação química, adsorção, entre outros) ou biológicos (filtros biológicos, lagoas de estabilização, reatores anaeróbios, entre outros), as quais podem ser empregadas isoladamente ou combinadas (Jiang et al., 2023). A aplicação de determinada técnica depende das características específicas das águas residuais a serem tratadas e dos requisitos de qualidade da água final desejados. Entretanto, embora amplamente utilizadas, algumas desvantagens destas técnicas podem ser apontadas, incluindo a geração de lodos e resíduos, custo elevado, consumo de energia, impactos ambientais e, principalmente, limitações na remoção completa de certos poluentes, especialmente contaminantes emergentes ou persistentes (Krishnan et al., 2021).

Como um exemplo, metodologias que utilizam membranas, como a micro ou nano-filtração e a osmose reversa, podem apresentar alta eficiência no tratamento de águas residuais de inúmeros processos industriais (Hu et al., 2023). Entretanto, algumas limitações são observadas, incluindo o elevado custo, a realização de tratamento prévio do efluente e problemas relacionados às incrustações na membrana. Um exemplo de técnica simples e de baixo custo são as lagoas de estabilização, as quais utilizam microrganismos para degradação de compostos orgânicos (Rigotto et al., 2023). Entretanto, por utilizar microorganismos, como

bactérias, esse processo pode ser lento e suscetível à variação de temperatura e pH, além de não ser capaz de remover de forma eficiente todos os poluentes, especialmente aqueles persistentes ou de difícil degradação.

Portanto, há uma intensa busca por processos de tratamento de águas residuais que sejam econômicos, ecológicos e altamente eficazes. Neste contexto, os Processos Oxidativos Avançados são reconhecidos como metodologias promissoras de alta eficácia na remoção de compostos poluentes. Em comparação aos métodos convencionais, eles emergem como uma alternativa notável e economicamente viável. Esses procedimentos podem ser implementados por meio de uma variedade de técnicas, incluindo fotólise, fenton, Foto-Fenton, ozonização, fotocatálise, oxidação utilizando peróxido de hidrogênio, entre outras, que têm sido amplamente empregadas para a degradação de poluentes resistentes aos métodos tradicionais (Vinayagam et al., 2024). Em geral, nos processos oxidativos avançados, ocorre a formação de radicais hidroxila ( $\text{OH}^\bullet$ ), espécies reativas de alto potencial redox, responsáveis pela degradação de contaminantes, desde aqueles com estruturas moleculares simples até as mais complexas.

O presente trabalho visa realizar uma análise bibliométrica sobre os avanços científicos observados nos métodos de tratamento de águas residuais baseados em POAs. De maneira geral, a análise bibliométrica é uma ferramenta eficaz para explorar e examinar dados científicos presentes em artigos publicados, permitindo identificar o progresso e as tendências emergentes em um campo específico de pesquisa. O estudo buscou avaliar a progressão do número de artigos publicados por ano, país e áreas de pesquisa, utilizando o website Web of Science como banco de dados. O trabalho também visa identificar e apresentar os destaques de pesquisa dos 3 métodos baseados em POAs comumente encontrados na literatura. Por fim, é apresentada uma matriz SWOT atualizada, indicando os pontos de força, fraqueza, ameaças e oportunidades dos métodos.

### PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS

Os POAs são técnicas de oxidação inovadoras aplicados para a remoção ou mineralização de poluentes orgânicos ou misturas de poluentes com elevada toxicidade, incluindo fármacos (Adeoye et al., 2024), corantes (Mohammed et al., 2024), pesticidas (Sandoval et al., 2022), metais pesados (Hama Aziz & Mustafa, 2024), entre outros poluentes emergentes. Desta forma, os POAs são considerados mais promissores para a aplicação quando comparados a outros métodos de tratamento, como osmose reversa e adsorção em carbono ativado, visto que, nestes últimos, os contaminantes são transferidos de uma fase para outra sem que haja ocorrência da sua degradação (Salbego et al., 2015). Apesar da existência de diversos sistemas baseados em POAs, tais como ozonização, fotocatálise, processo Fenton e foto-Fenton, todos eles apresentam a produção de espécies reativas de oxigênio (ROS, do inglês *reactive oxygen species*), os quais atuam na degradação do poluente.

Os ROS podem ser radicais livres, tais como o radical hidroxila ( $\text{•OH}$ ), o íon radical superóxido ( $\text{O}_2^{\bullet-}$ ) e o radical hidroperoxila ( $\text{HO}_2^\bullet$ ) ou compostos não radicalares, como o peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) e o oxigênio singlete ( ${}^1\text{O}_2$ ), uma espécie eletronicamente excitada da

molécula de oxigênio molecular (Humayun et al., 2025). A Tabela 1 apresenta o potencial de redução destas espécies oxidantes. Dependendo do tipo de ROS ou da natureza química do composto poluente, uma variedade de mecanismos pode levar à degradação, incluindo oxidação, redução, degradação catalítica ou enzimática e reações fotoquímicas. Compreender esses mecanismos é essencial para otimizar as condições de reação, buscando a eficácia e seletividade desejadas do processo de degradação.

**Tabela 1.** Potencial de redução ( $E^\circ$ , em V) de vários agentes oxidantes

Agente oxidante	Potencial de redução ( $E^\circ$ , em V)
$F_2$ (Flúor)	3,03
$\cdot OH$ (Radical hidroxila)	2,80
$^1O_2$ (Oxigênio singlete)	2,42
$O_3$ (Ozônio)	2,07
$H_2O_2$ (Peróxido de oxigênio)	1,78
$ROO^\bullet$ (Radical hidroperóxido)	1,7
$Cl_2$ (Cloro)	1,36

Fonte: Autores (2024).

Como apresentado na Tabela 1, dentre os ROS, os radicais hidroxilas são os que apresentam maior reatividade. Vários mecanismos podem levar à geração desta espécie oxidante, os quais serão expostos posteriormente no texto. Dentre os radicais apresentados, o radical hidroxila é altamente reativo e não seletivo, permitindo a oxidação de uma ampla gama de compostos orgânicos, resultando na formação de intermediários menos complexos e menos nocivos. Em alguns casos, essa oxidação pode levar à completa mineralização dos poluentes. Um dos compostos mais comumente utilizados para geração de radicais oxigenados é o peróxido de hidrogênio, através da sua decomposição na presença de íons metálicos ou por irradiação utilizando luz ultravioleta. Quando o  $H_2O_2$  está em solução, pode ocorrer também a sua reação direta com as espécies contidas no efluente, gerando a oxidação dessas (SOUZA et al., 2019). Outro oxidante poderoso é o ozônio; sua atuação na oxidação de poluentes pode ser realizada por mecanismo direto ou indireto. A maior vantagem em utilizar  $O_3$  para geração de radicais livres dá-se pelo fato de a absorvância do ozônio ser significativamente mais elevada quando comparada com o peróxido de hidrogênio; assim, o  $O_3$  pode ser utilizado no tratamento de efluentes que possuem elevada absorvância (Olatunde et al., 2020).

Os POAs também podem ser combinados a outros tratamentos convencionais, potencializando a remoção do composto poluente. Por exemplo, apesar de amplamente utilizados como estratégia industrial para tratamento de efluentes aquáticos, os processos biológicos apresentam limitação na degradação de compostos orgânicos complexos ou refratários. Entretanto, quando combinados, os POAs têm a capacidade de decompõr compostos que são resistentes à degradação por processos biológicos convencionais, o que os torna mais propensos a serem degradados por microorganismos ou bioenzimas durante as etapas posteriores do tratamento biológico (Babu Ponnusami et al., 2023). Neste contexto, Bar-Niv et al. reportaram a utilização do UV- $H_2O_2$  seguido de tratamento com biofilme de *Acinetobacter sp.* para o tratamento de compostos fenólicos em concentrações tóxicas (Bar-Niv et al., 2022). Segundo os autores, apenas o tratamento biológico ou a aplicação do POA não são capazes de remover quantidades significativas de fenol nas amostras. Entretanto,

quando as técnicas foram combinadas, foi alcançada a remoção completa dos compostos fenólicos, bem como uma redução de 75% na concentração de matéria orgânica.

Na Tabela 2, estão apresentadas algumas das principais vantagens e desvantagens de utilizar métodos baseados em POAs. Como pode ser observado, apesar dos POAs possuírem notórias vantagens quando comparados a outros métodos utilizados para tratamento de contaminantes, o alto custo de reagentes e o elevado consumo de energia necessário para o processo como a luz UV, são definidos como os principais obstáculos na utilização dos POA em grande escala (Amorim; Leão; Moreira, 2009).

**Tabela 2.** Vantagens e desvantagens na utilização de métodos baseados em Processos Oxidativos Avançados

Vantagens	Desvantagens
Alta eficiência na degradação de poluentes orgânicos persistentes e micropoluentes	Custos elevados, como, por exemplo, o consumo de energia e reagentes caros.
Ampla aplicabilidade em diversos setores	Necessidade de tratamento de resíduos e catalisadores
Minimização de subprodutos tóxicos	Algumas reações podem gerar de subprodutos complexos ou tóxicos.
Flexibilidade operacional e compatibilidade com tratamentos clássicos	Exigência de monitoramento e controle constantes de parâmetros operacionais
Possibilidade de reuso de catalisadores	Limitação de escala
Desenvolvimento tecnológico contínuo	Complexidade de implementação de plantas

Fonte: Autores (2024).

## METODOLOGIA

### REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

O método da bibliometria permite observar o conteúdo científico e tecnológico presente em um depósito de dados. Essa técnica é baseada no cálculo de artigos científicos, citações e patentes, e seu objetivo será determinar os dados a serem analisados, podendo ser o texto que constitui o artigo, como também nome de autores, palavras-chave, citações, entre outras informações extraídas do repositório de informações bibliográficas (Soares et al., 2016). Para realizar a análise bibliométrica no presente estudo, foi utilizada a base de dados Web of Science (disponível on-line no endereço webofscience.com), pertencente à empresa Clarivate e responsável por ter em seu repositório conceituados artigos publicados em revistas científicas no mundo inteiro, além de possuir informações de centenas de periódicos científicos, livros e relatórios.

A pesquisa foi realizada entre os meses de março e junho de 2024. Inicialmente, a estratégia de busca foi pesquisar o termo “*advanced oxidation processes*” presente em todos os campos do Web of Science, sendo alguns deles título, resumo e data de publicação. Além disso, a variação temporal utilizada foram os extremos presentes na base de dados, sendo eles 1945 e 2023. Sabendo da existência das inúmeras técnicas de POAs, a pesquisa foi feita novamente com os termos “*advanced oxidation processes*”, “*water treatment*” juntamente com cada uma das técnicas presentes na Tabela 3, encontrada mais adiante na discussão desse artigo, tendo como objetivo refinar ainda mais os dados e verificar quais técnicas possuem os números mais expressivos quando relacionadas com os dois termos em questão. Por fim, determinou-se o número de publicações de cada técnica e foram feitas análises separadamente para cada uma delas. Além disso, foi elaborada uma matriz SWOT com o objetivo de analisar um conjunto de



CC BY 4.0  
Attribution 4.0  
International

artigos e determinar os seus pontos positivos e negativos. Para selecionar esses artigos, utilizou-se o mecanismo de pesquisa análogo ao que foi utilizado na inserção do termo “*water treatment*” na base de dados Web of Science, com um intervalo temporal de 10 anos. Feito isso, filtram-se os resultados com a opção “mais citados primeiro” e selecionaram-se os 10 trabalhos mais citados de acordo com a base de dados.

#### **CONFECÇÃO DO MAPA DE PALAVRAS-CHAVE**

Para a confecção do mapa de palavras-chave, utilizou-se o software VOSviewer (<http://www.vosviewer.com>), o qual está disponível de forma gratuita para estudos bibliométricos. Informações detalhadas sobre a metodologia e processo de criação dos mapas usando esta ferramenta estão disponíveis no manual do usuário (van Eck & Waltman, 2023). Para a construção do mapa de palavras-chave, foram utilizados dados contidos nos 5000 artigos mais citados da área no banco de dados do Web of Science.

#### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

##### **O PROGRESSO DO NÚMERO DE PUBLICAÇÕES CONTENDO O TERMO “ADVANCED OXIDATION PROCESSES”**

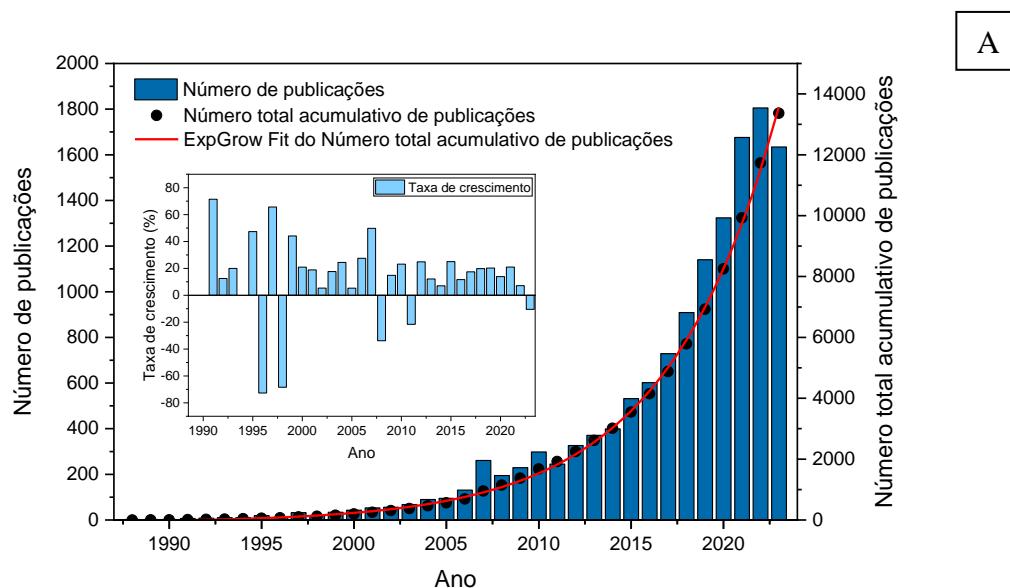
Foi utilizada a base de dados do Web of Science para determinar o número de publicações contendo o termo “*advanced oxidation processes*”, selecionando a opção “Todos os campos” presente na plataforma. A primeira publicação registrada nesta base de dados ocorreu no ano de 1988, publicada nos Estados Unidos no periódico “Jornal American Water Works Association”. Na Figura 1A, é possível visualizar o crescimento do número de publicações contendo o termo em questão entre os anos de 1988 e 2023. Como pode ser observado, o número de publicações vem aumentando de maneira exponencial ao longo deste período, passando de 2 publicações em 1988, para 1805 em 2022, ano que apresentou o maior número de publicações. O número total acumulativo de trabalhos publicados, ou seja, a soma do número de publicações em cada ano, também é mostrado na Figura 1A. A análise mostra que, apenas na plataforma avaliada, foram registradas 13367 publicações até o momento. Considerando a última década (2013-2023), observou-se um aumento de 510% no número total acumulativo de trabalhos publicados. A taxa de crescimento das publicações (ver *insert* na Figura 1A) também foi positiva em quase todos os anos da série histórica, exceto em 1996, 1998, 2008, 2011 e 2023. Estes resultados indicam o campo de pesquisa está em crescimento significativo e, consequentemente, tornando-se cada vez mais popular.

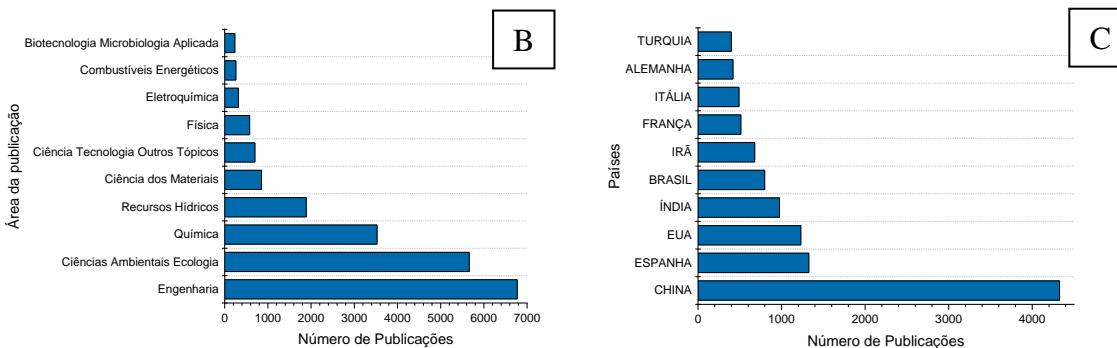
A Figura 1B apresenta as áreas de pesquisa em que estes trabalhos contendo o termo “*advanced oxidation processes*” são publicados. É importante destacar que foram encontradas 112 áreas de pesquisa contendo o termo analisado. Porém, apenas aquelas que apresentaram números mais relevantes de trabalhos publicados foram selecionadas para a análise. A Engenharia foi a área de pesquisa que apresentou o maior número de trabalhos contendo o termo analisado (6772 publicações), representando 50,2% valor total encontrado. Em seguida, Ciência Ambientais Ecologia e Química compõem o segundo e terceiro lugares, onde foram encontradas 5660 e 3526 publicações relacionadas com essas áreas, respectivamente. Recursos Hídricos, a área de pesquisa que está diretamente relacionada ao foco deste trabalho, aparece na quarta posição com um total de 1888 trabalhos publicados, demonstrando que o tratamento de água se configura como uns dos assuntos mais estudados

e relacionados com a utilização de POAs. É importante destacar que, devido ao caráter multidisciplinar da área, o mesmo artigo pode ser classificado em mais de uma área.

Na Figura 1C, é apresentada a evolução do termo “*advanced oxidation processes*” em relação à categoria países. O termo foi encontrado em trabalhos de 119 países, porém, foram selecionados os 10 países que apresentaram números mais expressivos de publicações. Como pode ser observado, a China consagra-se como o país com o maior número de publicações, com um total de 4327 contendo o termo em questão, representando 30,5% do valor total, uma porcentagem maior do que a de 92 países combinados. Em segundo lugar está a Espanha, com 1326 publicações, um número equivalente a um terço do valor apresentado pelo primeiro lugar. Em seguida, os Estados Unidos, apesar do pioneirismo no assunto, apresentam-se em terceiro lugar com 1230 publicações. Apesar de configurar como o país que mais publica na área, a China possui apenas 1 pesquisador entre os 15 autores que mais publicam na área. Por outro lado, a Espanha apresenta 7 pesquisadores no ranking, seguido pela França e Austrália, com 2 pesquisadores entre os 15 com maior número de publicação. É importante ressaltar o Brasil como um destaque em escala mundial, aparecendo na lista entre os 5 primeiros colocados, com um total de 798 trabalhos publicados. A análise realizada pela plataforma permite localizar as universidades brasileiras que mais publicam no campo avaliado, destacando-se as universidades estaduais, como a Universidade de São Paulo (USP), a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) e a Universidade Estadual Paulista (UNESP), e as federais, como a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) e a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

**Figura 1.** Compilado de figuras referentes a análise bibliométrica realizada contendo o termo “*advanced oxidation processes*”: A) por ano de publicação; B) por país; C) por área de pesquisa; D) mapa de palavras-chave utilizadas nas publicações

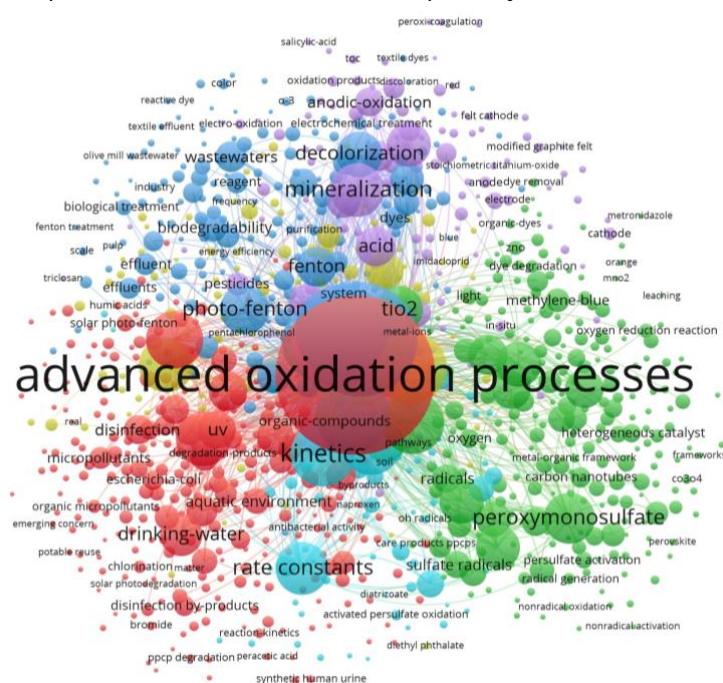




Fonte: Autores, utilizando dados gerados pela base de dados *Web of Science* (2024).

A Figura 2 apresenta um mapa de palavras-chave utilizadas nas 5000 publicações com maiores citações na área dos POAs. Esta ferramenta permite avaliar a relevância de alguns temas e suas interconexões. Por exemplo, o tamanho das palavras-chave indica a frequência com que elas aparecem nos trabalhos. Assim, nota-se que os termos mais presentes, traduzidos para o português, são “processos oxidativos avançados”, “degradação”, “solução aquosa”, “mineralização”, “produtos farmacêuticos”, “água potável”, “efluentes aquosos”, “micropoluentes”, entre outros. Pela proximidade destas palavras-chave no gráfico, é possível concluir que os POAs são frequentemente utilizados em estudos que envolvem a degradação de diferentes agentes poluentes na água. Já os termos menores, que aparecem em menor frequência, podem indicar o desenvolvimento de novas áreas de pesquisa ou tecnologias relacionados ao tema. Por exemplo, termos como “nanomateriais”, “oxidação anódica”, “fotocatálise”, “ozonização” e “Foto-Fenton”, podem representar temas emergentes com potencial crescimento na área.

**Figura 2.** Mapa de palavras-chave utilizadas nas 5000 publicações com maiores citações na área



Fonte: Autores, utilizando dados gerados pela base de dados *Web of Science* (2024).

### FOCO NAS PUBLICAÇÕES SOBRE "ADVANCED OXIDATION PROCESSES" E TÉCNICAS ASSOCIADAS

Como abordado anteriormente, existem diversas técnicas que podem ser classificadas como processos oxidativos avançados, sendo algumas delas ozonização, processo de Fenton, fotocatalise heterogênea, entre outras. Dito isso, com o intuito de filtrar ainda mais os resultados e analisar a quantidade de publicações que cada técnica possui na base de dados Web of Science, utilizou-se o seguinte comando: "*advanced oxidation processes*" + técnica de processo oxidativo Na Tabela 3, é possível visualizar que as 3 técnicas que possuem os números de publicações mais expressivos são: Foto-Fenton, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV e fotocatálise heterogênea. Sabendo disso, com o intuito de fazer uma filtragem maior dos resultados e dar mais enfoque no tema principal deste trabalho, a análise foi feita contendo os termos "*advanced oxidation processes*", "*water treatment*" e as 3 técnicas mais relevantes, fazendo esse processo para cada técnica separadamente.

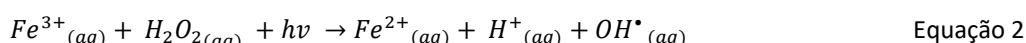
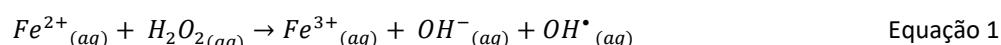
**Tabela 3.** Quantidade de publicações relacionando o termo "*advanced oxidation processes*" com as técnicas de processos oxidativos

<i>"advanced oxidation processes"</i> + técnica	Nº de publicações
<i>"photo-fenton"</i>	1811
<i>"H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV"</i>	499
<i>"heterogeneous photocatalysis"</i>	417
<i>Ozonólise "O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>"</i>	39

Fonte: Autores (2024).

### PROCESSO FOTO-FENTON

O processo Foto-Fenton surgiu como uma otimização da atividade catalítica e eficiência de degradação do processo Fenton através da aplicação da energia fornecida pela luz (artificial ou solar). Esse processo é definido como uma técnica promissora para tratar águas e efluentes por apresentar elevada eficiência em oxidar poluentes orgânicos de difícil degradação. De maneira geral, o processo é baseado na formação do ciclo redox Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup> via fotocatalise, o qual promove a formação de radicais hidroxila (C. Wang et al., 2023). Como demonstrado na Equação 1, o ciclo é iniciado com uma reação que ocorre em um meio acidificado envolvendo íons Fe<sup>2+</sup> e o peróxido de hidrogênio. Em seguida, o produto Fe<sup>3+</sup> gerado passa por uma reação de fotólise, devido a radiação UV/visível, os quais são reduzidos em íons Fe<sup>2+</sup>, assim como mostra a equação da Equação 2. Por fim, os radicais hidroxilos gerados oxidam as espécies orgânicas, representadas como RH na Equação 3.



Na Tabela 4, é possível visualizar os parâmetros mais importantes, os quais têm relação direta com a eficácia nesse tipo de POA.



CC BY 4.0  
Attribution 4.0  
International

**Tabela 4.** Parâmetros relevantes na aplicação do processo Foto-Fenton

pH	O meio acidificado é considerado ideal para que as espécies orgânicas sejam oxidadas, ressaltando que ao final dos experimentos, o meio deve ser ajustado para um pH alcalino com o intuito de cessar o processo
Temperatura	O processo é realizado geralmente em temperatura ambiente, visto que em temperaturas acima de 40°C ocorre a decomposição do peróxido gerando água e oxigênio, assim, tornando desfavorável a formação de radicais OH <sup>-</sup>
Tempo de reação	Esse parâmetro, assim como os demais citados, possui dependência em relação ao poluente que irá sofrer degradação, além de ser avaliado também levando em consideração a eficiência adquirida e os custos relacionados com a utilização de um elevado tempo de reação
Incidência de radiação UV	Dentre as fontes artificiais presentes no mercado, como lâmpadas de deutério, xenônio e de vapor de mercúrio, a última citada sobressai em relação as outras devido ao menor custo e seu fácil manuseio, ressaltando que a utilização de espectro ultravioleta artificial é a fonte mais usada no processo Foto-Fenton. Além disso, um dos pontos mais importantes nesse processo é garantir que todas as regiões recebam a mesma quantidade do parâmetro em questão, concluindo que posição da fonte de radiação é suma importância para esse tipo de POA

Fonte: Autores baseando em dados contidos em (Posser, 2016)

Vários trabalhos na literatura reportaram a eficiência desta abordagem para degradação de uma variedade de poluentes. Por exemplo, Li et al (2022) utilizaram o processo Foto-Fenton para realizar a remoção de quatro produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais de águas naturais, sendo eles dietiltoluamida, paracetamol, cafeína e triclosan. Os autores observaram que a junção do processo com radiação UVC foi responsável por remover, no primeiro minuto de reação, 29,6%, 80,3%, 3,1% e 88,4%, respectivamente. Após 30 minutos de reação, mantendo a ordem dos compostos citados anteriormente, a taxa de remoção foi equivalente a 99%, 100%, 99,5% e 100%, demonstrando que o processo Foto-Fenton apresentou elevado potencial para remover as espécies analisadas. Em outro trabalho, Al-Zadjali et al., 2023 utilizaram radiação solar para realizar a aplicação do reagente Foto-Fenton com e sem TiO<sub>2</sub>. Dentre os parâmetros analisados neste trabalho, destacam-se a Demanda Química de Oxigênio (DQO), Carbonos totais, pH, Sólidos Dissolvidos Totais, Condutividade e Salinidade. Por fim, concluiu-se que o Foto-Fenton é recomendado como um fotocatalisador para ser utilizado na diminuição de contaminantes presentes na água do mar. Gabet et al (2023) utilizaram magnetita proveniente de sucata ferrosa industrial como fonte de ferro sustentável na degradação Foto-Fenton da substância carbamapezina, considerada um poluente emergente em corpos hídricos. O processo Foto-Fenton utilizado com a presença de magnetita e citrato foi responsável por degradar 77% do poluente em questão, o qual teve sua eficiência aumentada para 99% quando elevou-se o tempo de contato prévio entre a magnetita e o citrato. Outro ponto observado é que a magnetita poderia ser utilizada no processo em 5 ciclos consecutivos sem apresentar perda da sua eficiência.

A Foto-Fenton foi a técnica que apresentou os resultados mais expressivos na Tabela 3. Colocando-se os termos “advanced oxidation processes”, “water treatment” e “photo-fenton”, foram encontrados 499 trabalhos publicados. Ao todo, a base de dados forneceu publicações oriundas de 74 países, sendo a Espanha o país que apresentou o maior número de publicações com 102 encontradas. Em relação às áreas de pesquisa com mais publicações

encontradas, percebemos que a área de Engenharia continua demonstrando sua relevância com 252 trabalhos publicados, valor equivalente a 50% do valor total.

### PROCESSO H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV

O composto peróxido de hidrogênio vem sendo utilizado em larga escala na geração de radicais livres com o objetivo de oxidar moléculas orgânicas complexas. Quando combinado com a radiação UV, é criada a técnica H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV, a qual tem a habilidade de degradar compostos orgânicos de forma eficaz e efetiva. Nesse tipo de processo, entende-se que o radical de interesse, também conhecido como hidroxila, é gerado através da fotólise UV do peróxido de hidrogênio, representada na equação 4 (Zhu et al., 2023). Dentre as características atribuídas a essa técnica, podem ser destacar os custos relativamente baixos, efetividade na degradação dos poluentes e por ser ecologicamente amigável (Zhang et al., 2023a). Estas vantagens fazem da técnica uma candidata para aplicações nas indústrias, além de ser definida como ideal para tratar águas residuais com altas concentrações de compostos orgânicos (Zhang et al., 2023b).



Em um artigo publicado por Lee et al., foi reportada uma eficiência de remoção de parabenos e seus derivados halogenados superior a 90% quando a técnica H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV foi aplicada em efluentes aquosos (Lee et al., 2022). Este estudo revelou que ambos  $OH^{\bullet}$  e irradiação de luz UV contribuíram para a eliminação dos poluentes avaliados. Em outro trabalho, Pai e Wang (2022) estudaram a comparação de alguns processos de tratamento utilizados na remoção de produtos farmacêuticos e cuidados pessoais (PFCPs) da água, sendo esses processos de cloração, UV, UV/Cloro e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV. Após analisar a eficiência de cada método, percebeu-se que a combinação do peróxido de hidrogênio com radiação UV teve seu desempenho de remoção aumentado quando comparado com a utilização de radiação UV sem a espécie. Além disso, a geração de subprodutos de desinfecção foi inferior quando comparada com a geração oriunda do processo UV/Cloro. Alvim et al. (2020) também realizaram a comparação de processos, sendo eles UV, UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e ozonização, na remoção de diversas substâncias farmaceuticamente ativas presentes em um concentrado de águas superficiais. A partir do estudo, foi concluído que a medida que fosse aumentando a dosagem do peróxido, a eficiência do processo ia sendo elevada, alcançando valores equivalentes a 99.9%. Além disso, os POAs demonstraram a capacidade de diminuir efetivamente a coloração do efluente e as quantidades de nitrogênio total e carbono orgânico total.

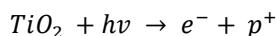
A técnica da H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV demonstrou resultados relevantes na pesquisa bibliométrica, com 132 publicações relacionando a técnica com os outros dois termos. Em relação aos países que se destacaram com os maiores números de publicações, a China é o país com mais trabalhos publicados, um número equivalente a 19 publicações. A Espanha demonstra novamente sua relevância no assunto, sendo o segundo país com mais trabalhos publicados relacionados com os 3 termos analisados, representando 10,6% do valor total, porcentagem equivalente a 14 publicações. A Engenharia continua sendo a área com mais trabalhos publicados, sendo, nessa análise, responsável por representar 62% do valor total, uma porcentagem equivalente a 83 publicações.

CC BY 4.0  
DEED  
Attribuição 4.0  
Internacional

### FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA

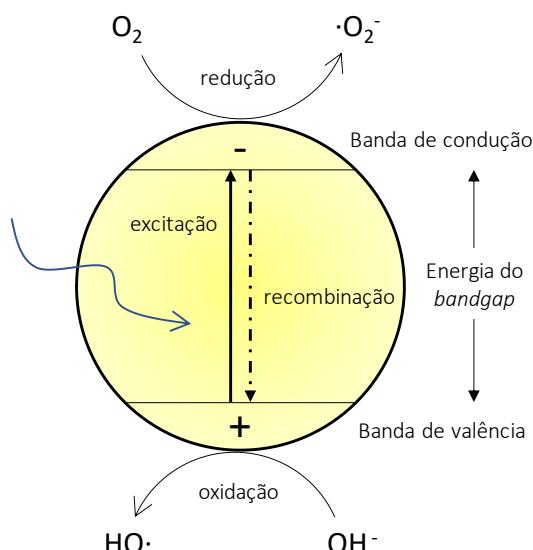
Assim como diversos POAs, essa tecnologia é caracterizada por ser uma rota alternativa em relação às utilizadas convencionalmente, além de possuir a habilidade de degradar espécies orgânicas com considerável toxicidade, utilizando o oxigênio do meio necessário para que ocorra reação (Monteiro et al., 2023). Também conhecida como foto-oxidação heterogênea, essa tecnologia apresenta diversas vantagens na sua utilização, como, por exemplo, o uso de um catalisador sólido, visto que há possibilidade de removê-lo do processo e fazer a aplicação deste em tratamentos futuros. Outra característica importante de ressaltar sobre essa técnica é a possibilidade de ser conduzida sob condições ambiente de temperatura e pH, assim, eliminando a necessidade de controlar parâmetros ambientais durante o processo. Dentre as diversas espécies oxigenadas produzidas nesse POA, destacam-se os radicais superóxidos e radical hidroxila pelo elevado potencial de redução, como apresentado na Tabela 1. Entretanto, o tipo de ROS gerado dependerá de diversos fatores, incluindo a natureza do photocatalisador, o tipo de radiação luminosa, pH do meio, presença de oxigênio dissolvido, temperatura, entre outros. Na geração dessas espécies reativas de oxigênio, essa tecnologia faz o uso de um catalisador como superfície ativa, sendo o dióxido de titânio a espécie catalítica mais usada atualmente (Blanchon et al., 2023).

A produção dos radicais oxigenados está representada na Figura 3, onde inicialmente há foto-excitação do catalisador, representada na equação da reação 5.



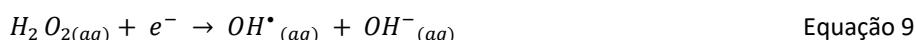
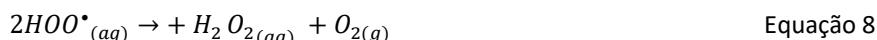
Equação 5

**Figura 3.** Processo de formação de radicais oxigenados através da fotocatálise



Fonte: Autores (2024).

Em seguida, os elétrons e buracos fotogerados tornam-se disponíveis na superfície do catalisador onde ocorrerá reações com as moléculas adsorvidas. Por fim, há ocorrência de reações do tipo foto-oxidação e foto-redução devido às moléculas de oxigênio e água estarem adsorvidas na superfície catalítica, assim, gerando os radicais oxigenados, os quais conseguem reagir com as substâncias que estão perto do catalisador (Blanchon et al., 2023). As reações a seguir representam as etapas de formação dos radicais mencionados.



Vários trabalhos na literatura empregaram a técnica para a remoção de uma variedade de poluentes. Por exemplo, John et al (2021), que estudaram a combinação da fotocatálise heterogênea e oxidação envolvida com persulfato ativado, com o intuito de remover o contaminante farmacêutico diclofenaco, visto que este poluente é comumente encontrado em corpos hídricos. A junção das duas técnicas gerou como resultado uma eficiência de remoção equivalente a mais de 98% em apenas 30 minutos, demonstrando que é possível combinar a fotocatálise com outras técnicas e atingir resultados promissores. Similar ao estudo anterior devido à combinação de duas técnicas, Guz et al. (2023) realizaram a associação da fotocatálise heterogênea com o processo de adsorção tendo como objetivo degradar o corante amarelo Tartrazina, um potencial poluente ambiental presente em grande quantidade nos efluentes industriais devido ao seu uso excessivo nesse ramo. Outro ponto importante no estudo em questão foi a síntese do fotocatalisador  $\text{CuNb}_2\text{O}_6$ , sendo esse material utilizado na associação das duas técnicas para degradar o corante citado, apresentando resultados satisfatórios, sendo eles redução de 94% de espécies cromóforas e 86% de espécies aromáticas. A Tabela 5 apresenta exemplos de artigos que reportaram a degradação de diferentes poluentes orgânicos, incluindo fármaco, pesticida e corantes, e os fotocatalisadores utilizados.

Por fim, a última técnica analisada na revisão bibliométrica foi a fotocatálise heterogênea, sendo o terceiro processo oxidativo que apresentou mais resultados expressivos, como é possível observar na Tabela 3. Fazendo a análise com os 3 termos, sendo eles “*advanced oxidation processes*”, “*water treatment*” e “*heterogeneous photocatalysis*”, o resultado foi similar ao encontrado na última técnica analisada, sendo registrados 132 trabalhos publicados. Realizando-se a análise em relação ao parâmetro “países”, a Espanha, assim como no item 3.4, demonstrou sua relevância em mais uma técnica analisada, sendo o país responsável por ter o maior número de publicações, representando 21,2% do valor total, devido aos seus 28 trabalhos publicados. Assim como nas análises anteriores, a Engenharia demonstrou novamente sua relevância devido aos 63 trabalhos publicados relacionados com essa área, um valor que representa 47% do total analisado.

**Tabela 5.** Exemplos de artigos que reportaram a degradação de diferentes poluentes orgânicos aquáticos

Catalisador	Fonte de luz	Poluente	Eficiência de degradação	Referência
$\text{TiO}_2$	Solar	Estrogênio	85%, em 180 min	(Padovan et al., 2021)
$\text{TiO}_2:\text{Cu}/\text{GO}$	Lâmpada VIS	Clorpirimofos	91,4%, em 80 min	(Esfandian et al., 2024)
ZnO/Au	Solar Lâmpada UV 25W	Corante AZO	~65%, em 60 min ~45%, em 60 min	(Andrade et al., 2017)
$\text{Bi}_2\text{MoO}_6/\text{ZnO}$	Solar	Diclofenaco	90%, em 100 min	(Oliveira et al., 2024)
$\text{CuNb}_2\text{O}_6$	Lâmpada UV 125W	Tartrazina	~94%, em 75 min	(Guz et al., 2023)

Fonte: Autores (2024).



## MATRIZ SWOT

Na Tabela 6, está apresentada uma série de artigos selecionados, os quais foram utilizados para elaborar a matriz SWOT (disponível na Figura 4). Assim, é possível perceber que os POAs apresentaram diversos pontos positivos que confirmam a versatilidade dos métodos para o tratamento de diversos tipos de contaminantes, a segurança, viabilidade econômica e potencial de inovação na utilização das técnicas. Por outro lado, os pontos negativos apresentados demonstram a necessidade de superar diversos desafios, incluindo a complexidade operacional, escala, geração de subprodutos e resistência à mudança por parte de alguns setores industriais.

**Tabela 6.** Trabalhos analisados para elaboração da Matriz SWOT

Título da Publicação	Autores
<i>Application of peroxyomonosulfate and its activation methods for degradation of environmental organic pollutants: Review</i>	(Ghanbari & Moradi, 2017)
<i>Review of iron-free Fenton-like systems for activating H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in advanced oxidation processes</i>	(Bokare & Choi, 2014)
<i>Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review.</i>	(Brillas & Martínez-Huitl, 2015)
<i>Photocatalytic organic pollutants degradation in metal-organic frameworks.</i>	(C.-C. Wang et al., 2014)
<i>Advanced oxidation processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review</i>	(Oturan & Aaron, 2014)
<i>Electrochemical advanced oxidation processes: today and tomorrow. A review</i>	(Sirés et al., 2014)
<i>Electrochemical advanced oxidation processes: A review on their application to synthetic and real wastewaters</i>	(Moreira et al., 2017)
<i>Advanced oxidation processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review</i>	(Oturan & Aaron, 2014)
<i>Pharmaceuticals of Emerging Concern in Aquatic Systems: Chemistry, Occurrence, Effects, and Removal Methods</i>	(Patel et al., 2019)
<i>Applications of Continuous-Flow Photochemistry in Organic Synthesis, Material Science, and Water Treatment</i>	(Cambié et al., 2016)
<i>Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: A review</i>	(Yang et al., 2017)

Fonte: Autores (2024).

A complexidade operacional dos POAs está ligada ao controle preciso de múltiplas variáveis, como pH do meio, temperatura, e, em alguns casos, pressão e dosagem de reagentes. Tais parâmetros são essenciais para assegurar a eficácia e segurança do tratamento. Além disso, embora produzam subprodutos em menores quantidades quando comparados a outros métodos, esses subprodutos podem causar impactos ambientais negativos e demandar tratamentos complementares. A resistência à adoção desses processos geralmente está associada ao alto custo inicial para a implementação de plantas de tratamento, à carência de conhecimento técnico necessário para a operação da tecnologia e à necessidade de realizar ajustes em processos já estabelecidos.



CC BY 4.0  
DEED  
Attribution 4.0  
International

**Figura 4.** Matriz SWOT sobre Processos Oxidativos Avançados, elaborada de acordo com os artigos analisados

Matriz SWOT	
Positivo	Negativo
Forças	Fraquezas
Relativamente baratos; Alguns não necessitam o uso de reagentes químicos; Potencial para tratar uma ampla variedade de contaminantes	Necessidade de controlar o pH de águas residuais durante o processo de degradação; Poucas aplicações em larga escala. Geração de subprodutos tóxicos em alguns casos.
Oportunidades	Ameaças
Adequados para fins de reutilização de água que envolvem contato humano direto; Considerados processos promissores na purificação de água; Possibilidade de desenvolver tecnologias mais eficazes e econômicas.	Flutuações nos preços de matérias-primas ou fontes de energia; Resistência de alguns setores industriais à adoção de tecnologias avançadas.

Fonte: Autores (2024).

Dante desses desafios, a matriz SWOT sugere a necessidade de realização de estudos com o objetivo de ampliar a escala, otimizar o processo e reduzir custos. Nesse sentido, uma estratégia promissora é a criação de fluxos eficientes de células de trabalho, que permitem a integração de diferentes etapas do processo, otimização de processos unitários e a redução de desperdícios (Harris & Rother, 2002), além da exploração de energias renováveis e do desenvolvimento de materiais mais eficientes.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizou-se uma revisão bibliométrica e uma apresentação das tendências atuais sobre os processos oxidativos avançados utilizando a Web of Science como base de dados. A pesquisa revelou um aumento significativo no número de publicações a partir de 1988, com um salto notável a partir dos anos 2000. A partir de 1999, o termo "*water treatment*" começou a ser frequentemente associado a POAs, representando um quarto das publicações comparado ao termo isolado. A análise destacou a China como o país com o maior número de publicações, tanto no tema isolado quanto associado ao tratamento de água. O Brasil ocupou o quinto lugar em ambas as análises. A Engenharia foi identificada como a área de pesquisa com maior número de publicações, seguida pelas Ciências Ambientais, Química e Recursos Hídricos. As técnicas mais populares foram a Foto-Fenton,  $H_2O_2/UV$  e fotocatálise heterogênea, as quais foram submetidas a uma análise bibliométrica específica, resultando em diferenças significativas, como o número de publicações. Por fim, uma matriz SWOT foi elaborada para avaliar os pontos fortes e fracos presentes nos 10 trabalhos mais citados entre 2014 e 2023. A análise concluiu que os POAs apresentam características que os tornam viáveis e promissores para o tratamento de águas residuais, como a alta eficiência de degradação de vários poluentes, apesar de desafios ainda a serem superados, como o aumento da escala. A concentração de publicações nos últimos cinco anos sugere que o campo está em expansão, indicando a necessidade de mais pesquisas para otimizar essas técnicas e superar suas limitações.

## AGRADECIMENTOS

FAPES, CNPq e CAPES.

## REFERÊNCIAS

- Adeoye, J. B., Tan, Y. H., Lau, S. Y., Tan, Y. Y., Chiong, T., Mubarak, N. M., & Khalid, M. (2024). Advanced oxidation and biological integrated processes for pharmaceutical wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 353, 120170. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120170>
- Andrade, G. R. S., Nascimento, C. C., Silva Júnior, E. C., Mendes, D. T. S. L. & Gimenez, I. F. (2017). ZnO/Au nanocatalysts for enhanced decolorization of an azo

- dye under solar, UV-A and dark conditions. *Journal of Alloys and Compounds*, 710, 557-566. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.295>
- Babu Ponnusami, A., Sinha, S., Ashokan, H., V Paul, M., Hariharan, S. P., Arun, J., Gopinath, K. P., Hoang Le, Q. & Pugazhendhi, A. (2023). Advanced oxidation process (AOP) combined biological process for wastewater treatment: A review on advancements, feasibility and practicability of combined techniques. *Environmental Research*, 237, 116944. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116944>
- Bar-Niv, N., Azaizeh, H., Kuc, M. E., Azerrad, S., Haj-Zaroubi, M., Menashe, O., & Kurzbaum, E. (2022). Advanced oxidation process UV-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> combined with biological treatment for the removal and detoxification of phenol. *Journal of Water Process Engineering*, 48, 102923. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102923>
- Bokare, A. D. & Choi, W. (2014). Review of iron-free Fenton-like systems for activating H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> in advanced oxidation processes. *Journal of Hazardous Materials*, 275, 121-135. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.04.054>
- Brillas, E. & Martínez-Huitl, C. A. (2015). Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review. *Applied Catalysis B: Environmental*, 166-167, 603-643. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.016>
- Cambié, D., Bottecchia, C., Straathof, N. J. W., Hessel, V., & Noël, T. (2016). Applications of Continuous-Flow Photochemistry in Organic Synthesis, Material Science, and Water Treatment. *Chemical Reviews*, 116(17), 10276-10341. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00707>
- CDP. (2022). *Global Water Report 2022*. Carbon Disclosure Project. Recuperado de <https://www.cdp.net/en/research/global-reports/global-water-report-2022>
- Esfandian, H., Mirzaei, S., Chari, A. S., Ghadi, R. A., & Moqadam, I. H. (2024). Photocatalytic degradation of chlorpyrifos pesticide in aqueous solution using Cu-doped TiO<sub>2</sub>/GO photocatalysis vicinity of UV and visible light. *Materials Science and Engineering: B*, 305, 117385. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117385>
- Ghanbari, F. & Moradi, M. (2017). Application of peroxymonosulfate and its activation methods for degradation of environmental organic pollutants: Review. *Chemical Engineering Journal*, 310, 41-62. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.10.064>
- Guz, R., Tiburtius, E. R. L., & Pessôa, C. A. (2023). Association of adsorption and heterogeneous photocatalysis in the degradation of Tartrazine yellow dye with CuNb<sub>2</sub>O<sub>6</sub> synthesized and immobilized on chitosan membranes. *Inorganic Chemistry Communications*, 152, 110645. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.110645>
- Hama Aziz, K. H. & Mustafa, F. S. (2024). Advanced oxidation processes for the decontamination of heavy metal complexes in aquatic systems: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100567. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100567>
- Harris, R. & Rother, M. (2002). *Creating Continuous Flow: An Action Guide for Managers, Engineers & Production Associates*. Lean Enterprise Institute.
- Hu, Z., Guan, D., Sun, Z., Zhang, Z., Shan, Y., Wu, Y., Gong, C., & Ren, X. (2023). Osmotic cleaning of typical inorganic and organic foulants on reverse osmosis membrane for textile printing and dyeing wastewater treatment. *Chemosphere*, 336, 139162. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139162>
- Humayun, S., Hayyan, M., & Alias, Y. (2025). A review on reactive oxygen species-induced mechanism pathways of pharmaceutical waste degradation: Acetaminophen as a drug waste model. *Journal of Environmental Sciences*, 147, 688-713. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.11.021>
- Jiang, H., Chen, H., Duan, Z., Huang, Z., & Wei, K. (2023). Research progress and trends of biochar in the field of wastewater treatment by electrochemical advanced oxidation processes (EAOPs): A bibliometric analysis. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 10, 100305. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100305>
- Krishnan, R. Y., Manikandan, S., Subbaiya, R., Biruntha, M., Govarthanan, M., & Karmegam, N. (2021). Removal of emerging micropollutants originating from pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water and wastewater by advanced oxidation processes: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 23, 101757. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101757>
- Lee, W., Marcotullio, S., Yeom, H., Son, H., Kim, T.-H., & Lee, Y. (2022). Reaction kinetics and degradation efficiency of halogenated methylparabens during ozonation and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> treatment of drinking water and wastewater effluent. *Journal of Hazardous Materials*, 427, 127878. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127878>
- Mohammed, S., Prathish, K. P., Jeeva, A., & Shukla, S. (2024). Integrated Fenton-like and ozonation based advanced oxidation processes for treatment of real-time textile effluent containing azo reactive dyes. *Chemosphere*, 349, 140766. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140766>
- Moreira, F. C., Boaventura, R. A. R., Brillas, E., & Vilar, V. J. P. (2017). Electrochemical advanced oxidation processes: A review on their application to synthetic and real wastewaters. *Applied Catalysis B: Environmental*, 166-167, 603-643. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.016>

- Environmental*, 202, 217-261.  
<https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.08.037>
- Olatunde, O. C., Kuvarega, A. T., & Onwudiwe, D. C. (2020). Photo enhanced degradation of contaminants of emerging concern in waste water. *Emerging Contaminants*, 6, 283-302.  
<https://doi.org/10.1016/j.emcon.2020.07.006>
- Oliveira, R. A., Castro, M. A. M., Porto, D. L., Aragão, C. F. S., Souza, R. P., Silva, U. C., Bomio, M. R. D., & Motta, F. V. (2024). Immobilization of Bi<sub>2</sub>MoO<sub>6</sub>/ZnO heterojunctions on glass substrate: Design of drug and dye mixture degradation by solar-driven photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 452, 115619.  
<https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2024.115619>
- Oturán, M. A. & Aaron, J.-J. (2014). Advanced Oxidation Processes in Water/Wastewater Treatment: Principles and Applications. A Review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 44(23), 2577-2641.  
<https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829765>
- Padovan, R. N., de Carvalho, L. S., de Souza Bergo, P. L., Xavier, C., Leitão, A., dos Santos Neto, Á. J., Lanças, F. M., & Azevedo, E. B. (2021). Degradation of hormones in tap water by heterogeneous solar TiO<sub>2</sub>-photocatalysis: Optimization, degradation products identification, and estrogenic activity removal. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106442.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106442>
- Patel, M., Kumar, R., Kishor, K., Mlsna, T., Pittman, C. U. Jr., & Mohan, D. (2019). Pharmaceuticals of Emerging Concern in Aquatic Systems: Chemistry, Occurrence, Effects, and Removal Methods. *Chemical Reviews*, 119(6), 3510-3673.  
<https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00299>
- Posser, Y. M. (2016). *Degradação da cafeína através dos processos oxidativos avançados fenton e foto-fenton*.
- Preethi, Shanmugavel, S. P., Kumar, G., N, Y. K., M, G., & J, R. B. (2024). Recent progress in mineralization of emerging contaminants by advanced oxidation process: A review. *Environmental Pollution*, 341, 122842.  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122842>
- Rigotto, L., Aquino, S. F., Rigotto, J., Santos, G., Silva, L. M. L., & Santiago, A. F. (2023). Dynamics of dissolved organic matter (DOM) in waste stabilization ponds: Insights into co-treatment of sanitary sewage and landfill leachate. *Journal of Water Process Engineering*, 55, 104236.  
<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104236>
- Sandoval, M. A., Vidal, J., Calzadilla, W., & Salazar, R. (2022). Solar (electrochemical) advanced oxidation processes as efficient treatments for degradation of pesticides. *Current Opinion in Electrochemistry*, 36, 101125.  
<https://doi.org/10.1016/j.coelec.2022.101125>
- Saravanan, A., Deivayanai, V. C., Kumar, P. S., Rangasamy, G., Hemavathy, R. V., Harshana, T., Gayathri, N., & Alagumalai, K. (2022). A detailed review on advanced oxidation process in treatment of wastewater: Mechanism, challenges and future outlook. *Chemosphere*, 308, 136524.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136524>
- Sirés, I., Brillas, E., Oturan, M. A., Rodrigo, M. A., & Panizza, M. (2014). Electrochemical advanced oxidation processes: Today and tomorrow. A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(14), 8336-8367.  
<https://doi.org/10.1007/s11356-014-2783-1>
- Soares, P. B., Carneiro, T. C. J., Calmon, J. L., & Castro, L. O. da C. de O. (2016). Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados Web of Science. *Ambiente Construído*, 16, 175-185.  
<https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000100067>
- UNESCO. (2023). *The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and cooperation for water—UNESCO Digital Library*.  
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384655>
- Van Eck, N. J. & Waltman, L. (2023). *Manual for VOSviewer version 1 .6.20*. Recuperado de [https://www.vosviewer.com/documentation/Manual\\_VOSviewer\\_1.6.20.pdf](https://www.vosviewer.com/documentation/Manual_VOSviewer_1.6.20.pdf)
- Vinayagam, V., Palani, K. N., Ganesh, S., Rajesh, S., Akula, V. V., Avoodaiappan, R., Kushwaha, O. S., & Pugazhendhi, A. (2024). Recent developments on advanced oxidation processes for degradation of pollutants from wastewater with focus on antibiotics and organic dyes. *Environmental Research*, 240, 117500.  
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117500>
- Wang, C., Shi, P., Wang, Z., Guo, R., You, J., & Zhang, H. (2023). Efficient wastewater disinfection through FeOOH-mediated photo-Fenton reaction: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(6), 111269.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111269>
- Wang, C.-C., Li, J.-R., Lv, X.-L., Zhang, Y.-Q., & Guo, G. (2014). Photocatalytic organic pollutants degradation in metal-organic frameworks. *Energy & Environmental Science*, 7(9), 2831-2867.  
<https://doi.org/10.1039/C4EE01299B>
- Yang, Y., Ok, Y. S., Kim, K.-H., Kwon, E. E., & Tsang, Y. F. (2017). Occurrences and removal of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in drinking water and water/sewage treatment plants: A review. *Science of The Total Environment*, 596-597, 303-320.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.102>