

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

RICARDO MARCELO HORONZI

**PROCESSOS ELETROLÍTICOS APLICADOS NA REMOÇÃO DE FÁRMACOS
ANTIBIÓTICOS EM MEIO AQUOSO: MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA
LITERATURA**

MEDIANEIRA

2025

RICARDO MARCELO HORONZI

**PROCESSOS ELETROLÍTICOS APLICADOS NA REMOÇÃO DE FÁRMACOS
ANTIBIÓTICOS EM MEIO AQUOSO: MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA
LITERATURA**

**Electrolytic processes applied to the removal of antibiotics drugs in aqueous
medium: systematic mapping of the literature**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação,
apresentado como requisito para obtenção do título
de Licenciado em Química da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Ismael Laurindo Costa Junior

MEDIANEIRA

2025



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

RICARDO MARCELO HORONZI

**PROCESSOS ELETROLÍTICOS APLICADOS NA REMOÇÃO DE FÁRMACOS
ANTIBIÓTICOS EM MEIO AQUOSO: MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA
LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação,
apresentado como requisito para obtenção do título de
Licenciado em Química da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 10/Fevereiro/2025

Ismael Laurindo Costa Junior
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Juliane Maria Bergamin Bocardi
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Tainara Orlando
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

MEDIANEIRA

2025

Dedico este trabalho a toda minha família, pais Vanderlei F. Horonzi, Adirlene Ap. M. Horonzi, irmã Rafaela L. Horonzi e namorada Letícia Bueno Barbosa, pelo apoio e incentivo nesses anos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que, por meio de Sua infinita misericórdia, me permitiu concluir esse trabalho. Que isso me permita ser um operário ainda melhor para a construção de Seu Reino.

Agradeço aos Professores do curso de licenciatura em química da UTFPR campus Medianeira.

Aos meus pais Vanderlei F. Horonzi e Adirlene Ap. M. Horonzi, irmã Rafaela L. Horonzi pelo amor, ensinamentos, parceria e também pelo incansável esforço e dedicação para que eu chegasse até aqui.

Minha irmã Rafaela Leticia Horonzi, pela parceria e pelo cativar constante mesmo em dias sem sol.

A minha namorada Letícia Bueno Barbosa pela paciência e amor dedicado.

Aos meus colegas de curso, pois em muitos momentos, compartilhamos conhecimentos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ismael Laurindo Costa Junior, pelos ensinamentos, disponibilidade, paciência, confiança, comprometimento e grande parceria no desenvolver dos trabalhos.

A UTFPR viabilizou todo o aprendizado adquirido durante a graduação e, conseqüentemente, o desenvolvimento do presente trabalho.

A todos aqueles que, de alguma maneira, estiveram presentes e contribuíram para a realização desse estudo.

Eu denomino meu campo de Gestão do Conhecimento, mas você não pode gerenciar conhecimento. Ninguém pode. O que você pode fazer, o que a empresa pode fazer é gerenciar o ambiente que otimize o conhecimento.
(Davenport; Prusak, 2012)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Possíveis rota dos fármacos lançados no Ambiente.....	18
Figura 2 - Processo de eletrocoagulação.....	21
Figura 3 - Espécies Químicas geradas no eletrodo de alumínio.....	22
Figura 4 - Processo de eletro-oxidação	23
Figura 5 - Processo de eletroflotação	24
Figura 6 – Etapas do mapeamento sistemático.....	27
Figura 7 – Perfil temporal das publicações.....	31
Figura 8 – Frequência percentual de aplicações dos processos eletrolíticos... 	33
Figura 9 - Frequência percentual das principais classes de antibióticos em estudos envolvendo processos eletrolíticos de remoção.....	34
Figura 10 - Frequência percentual dos tipos de eletrólitos suporte utilizados para a remoção de antibióticos	37
Figura 11 - Frequência percentual das faixas de pH utilizados para a remoção de antibióticos	38

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Exemplos de fármacos encontrados no ambiente	17
Quadro 2 - Principais antibióticos encontrados em matrizes ambientais.....	19
Quadro 3 - Conjunto de artigos utilizados no mapeamento sistemático	30
Quadro 4 - Processos eletrolíticos utilizados.....	32
Quadro 5 – Antibióticos testados na aplicação de processos eletrolíticos.....	33
Quadro 6 - Tipos de eletrodos aplicado em sistemas eletrolíticos para remoção de antibióticos	35
Quadro 7 – Tipos de eletrólitos suporte aplicados em sistemas eletrolíticos para remoção de antibióticos	36
Quadro 8 - Faixa de PH aplicadas em sistemas eletrolíticos para remoção de antibióticos	37
Quadro 9 - Eficiência de remoção dos sistemas eletrolíticos para remoção de antibióticos	39

RESUMO

O tratamento de contaminantes farmacológicos, como os antibióticos, representa um desafio para a saúde pública e para o ambiente. Este estudo tem como objetivo realizar o mapeamento sistemático de artigos nos quais ocorre a aplicação de processos eletrolíticos como técnica de tratamento para remoção de antimicrobianos em meio aquoso. As bases *PubMed* e *Google Scholar* foram selecionadas como fonte da pesquisa. Foram aplicadas palavras-chaves e critérios de inclusão para identificação e seleção dos artigos reportados. Assim, foi obtido um conjunto de vinte artigos que compuseram o mapeamento sistemático. Dessas produções foram extraídos dados referentes ao ano de publicação, tipo de processo eletrolítico, antibiótico estudado, eletrodo utilizado, eletrólito suporte, faixa de pH testada e eficiência. A pesquisa revelou que o maior quantitativo de publicações ocorreu de 2019 a 2022. Os tipos de processos eletrolíticos mais comumente usados para antimicrobianos foram a eletrocoagulação e a oxidação-eletroquímica. Os antibióticos da classe da quinolonas foram os mais testados, com destaque para a ciprofloxacina. Além disso, como eletrólito suporte, as pesquisas indicaram uso majoritário do sulfato de sódio e como faixa de 5 a 8 como pH mais frequente. Foram identificados eletrodos contendo desde estruturas simples, como aqueles constituídos de ferro e alumínio à eletrodos sofisticados compostos de nanomateriais e metais mais nobres. Em termos de eficiência, pode-se concluir que o campo dos processos eletrolíticos e suas combinações é um espaço amplo para pesquisas futuras visando explorar suas potencialidades na área dos tratamentos avançados aplicados a contaminantes farmacológicos como os antibióticos.

Palavras-chave: contaminantes emergentes; antimicrobianos; eletroquímica; tratamento avançado.

ABSTRACT

The treatment of pharmacological contaminants, such as antibiotics, represents a challenge for public health and the environment. This study aims to systematically map articles in which electrolytic processes are applied as a treatment technique for the removal of antimicrobials in aqueous media. The PubMed and Google Scholar databases were selected as the research source. Keywords and inclusion criteria were applied to identify and select the reported articles. Thus, a set of twenty articles that comprised systematic mapping were obtained. Data regarding the year of publication, type of electrolytic process, antibiotic studied, electrode used, support electrolyte, pH range evaluated, and efficiency were extracted from these productions. The research revealed that the largest number of publications occurred from 2019 to 2022. The types of electrolytic processes most used for antimicrobials were electrocoagulation and oxidation-electrochemistry. Antibiotics of the quinolone class were the most tested, with emphasis on ciprofloxacin. Furthermore, as a supporting electrolyte, research indicated the majority use of sodium sulfate, and the most frequent pH range was 5 to 8. Electrodes containing structures ranging from simple ones, such as those made of iron and aluminum, to sophisticated electrodes composed of nanomaterials and more noble metals, were identified. In terms of efficiency, it can be concluded that the field of electrolytic processes and their combinations is a broad space for future research aimed at exploring their potential around advanced treatments applied to pharmacological contaminants such as antibiotics.

Keywords: emerging contaminants; antimicrobials; Electrochemistry; advanced treatment.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo Geral.....	15
2.2 Objetivos específicos.....	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 Impactos, desafios e soluções para a qualidade dos recursos hídricos no Brasil	16
3.2 Fármacos residuais no meio ambiente	17
3.2.1 Antibióticos como contaminantes ambientais.....	18
3.3 Processos eletrolíticas aplicados como tratamento	20
3.3.1 Eletrocoagulação.....	20
3.3.2 Eletro-oxidação	23
3.3.3 Eletroflotação	24
4 METODOLOGIA	26
4.1 Seleção das bases de dados.....	27
4.2 Identificação dos artigos	27
4.4 Análise detalhada e obtenção dos dados nos artigos selecionados	28
4.5 Organização e apresentação dos resultados	29
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da água é um assunto de extrema importância se falando em processos de descontaminação, dependemos muito para a sobrevivência humana, e para uma água potável, tratada por processos tecnológicos do a partir dos contaminantes emergentes.

Sobre a qualidade em recursos hídricos, de acordo com Horonzi *et al.* (2023), as áreas com fragilidades ambientais requerem o emprego de práticas eficientes de conservação da água e do solo. A intensa diversificação de produtos do agronegócio e atividades industriais trazem como consequências a contaminação de rios, lagos e lençóis subterrâneos.

Os fármacos têm se tornado uma preocupação crescente como novas contaminantes ambientais, especialmente em esgotos. Isso ocorre porque, ao serem consumidos, muitos medicamentos não são totalmente metabolizados pelo organismo e são excretados, sendo inseridos em esgoto, rios e oceanos. Além disso, o uso excessivo e inadequado de medicamentos contribui para a presença de substâncias farmacêuticas nas águas.

Diante disso, a veiculação desses contaminantes pode comprometer os ecossistemas aquáticos e afetar a saúde humana, uma vez que essas substâncias podem ser ingeridas por meio do consumo de água contaminada ou pela cadeia alimentar. Assim, a conexão entre os fármacos e as águas está no fato de que as substâncias químicas dos medicamentos acabam introduzidas no ambiente aquático, o que pode causar riscos em potencial tanto à biodiversidade quanto à saúde pública.

Em cenários de contaminação existe a preocupação quanto a remoção de substância indesejáveis como os fármacos. Isto, tem influência nas estações de tratamento de água e esgoto, em especial os fármacos antibióticos, que constituem incertezas e riscos devido ao impacto em potencial ao ambiente e na saúde pública relacionado ao fenômeno da resistência antimicrobiana.

Devido ao uso contínuo de antibióticos, que acabam dispostos nos solos e água a partir de diversas atividades antropogênicas, existe a preocupação em se propor metodologias e tecnologias eficientes para a mitigação dos impactos causados por essas substâncias. Diante disso, os processos eletrolíticos como a

eletrocoagulação tem sido sugerido como eficazes para remover esses compostos em meio aquoso.

Diante da necessidade de se remover poluentes indesejáveis com potencial de efeito adverso e dada a baixa capacidade de tratamento desses contaminantes por processos convencionais, a eletrocoagulação demonstra ser uma técnica simples e eficiente, na remoção de poluentes como os antibióticos residuais.

Nesse contexto, este estudo busca conhecer o panorama dos processos eletrolíticos aplicados como estratégia de remoção de fármacos por meio de um mapeamento sistemático da literatura.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Realizar o mapeamento sistemático da literatura sobre a remoção de fármacos antibióticos em sistemas aquosos empregando os processos eletrolíticos como estratégia de tratamento.

2.2 Objetivos específicos

- a) Analisar as diferentes abordagens eletrolíticas para remoção de fármacos em meio aquoso;
- b) Identificar as semelhanças e selecionar artigos relevantes sobre o assunto.
- c) Conhecer o panorama dos estudos de aplicação dos processos eletrolíticos como tratamento para remoção de antibióticos em águas residuárias.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Impactos, desafios e soluções para a qualidade dos recursos hídricos no Brasil

A poluição da água é um problema crescente no Brasil e no mundo, com impactos diretos e indiretos na saúde humana e no meio ambiente. Conforme Lima, Stachiw e Militão (2019), a fragilidade dos sistemas de saneamento, aliadas ao crescimento populacional, tem auxiliado para que esgotos domésticos e efluentes industriais sejam lançados em águas superficiais. O aumento da população está ligado à decadência da qualidade da água.

Montagnera, Vidala e Acayaba (2017) destaca que para os compostos de uso industrial, os próprios efluentes gerados durante o processo são as principais fontes de contaminação do ambiente.

De acordo com Mazhandu e Mashifana (2024), contaminantes emergentes representam riscos à saúde pública, afetando sistemas endócrinos, promovendo resistência bacteriana e bioacumulação na cadeia alimentar. A eficácia limitada dos métodos convencionais de tratamento de água levanta preocupações sobre a segurança do abastecimento.

Destacando os sérios riscos aos contaminantes emergentes, mas afeta o equilíbrio ambiental e a segurança alimentar. O fato de esses contaminantes poderem interferir no sistema endócrino e contribuir para a resistência a antibióticos e dos tratamentos convencionais de água que proporciona uma necessidade de inovação em tecnologias de purificação da qualidade da água.

Conforme Prado, Enzweiler e Paulino (2021), a remoção de poluentes emergentes por meio de processos como a adsorção, fotocatalise e processos oxidativos, têm sido objetos de estudos no tratamento de águas e proteção à saúde dos ecossistemas. Diante disso, existe a necessidade de mais pesquisas sobre estes poluentes e processos de tratamento para que se tornem viáveis as aplicações em escalas comerciais no futuro.

3.2 Fármacos residuais no meio ambiente

Para Bila e Dezotti (2003) a presença das substâncias com atividade estrogênica e de natureza farmacológica no meio ambiente é um problema de saúde ambiental, associado ao descarte de efluentes de ETE em corpos receptores. Essas substâncias podem afetar potencialmente os organismos aquáticos, representando um risco à saúde humana, presentes em fontes de água potável.

Devido ao grande consumo e a baixa remoção nos sistemas de tratamento, fármacos têm sido detectados em matrizes ambientais. No Quadro 1 demonstram-se algumas pesquisas com diferentes tipos de fármacos, matrizes ambientais e problemas causados.

Quadro 1 - Exemplos de fármacos encontrados no ambiente

Fármaco	Matriz Ambiental	Problemas Causados	Referências
Amoxicilina	Água superficial	Resistência bacteriana	Christian <i>et al.</i> (2003)
Paracetamol Ácido Acetilsalicílico Ibuprofeno Diclofenaco Cafeína Carbamazepina.	Água superficial	Contaminação dos corpos hídricos	Stumpf <i>et al.</i> (1999) Campanha <i>et al.</i> (2015) Thomas <i>et al.</i> (2014)
Diclofenaco, Ibuprofeno e Paracetamol	Água superficial	Efeitos ecotoxicológicos a diversos organismos não alvos como algas, moluscos, peixes e plantas aquática	Escher <i>et al.</i> (2019)

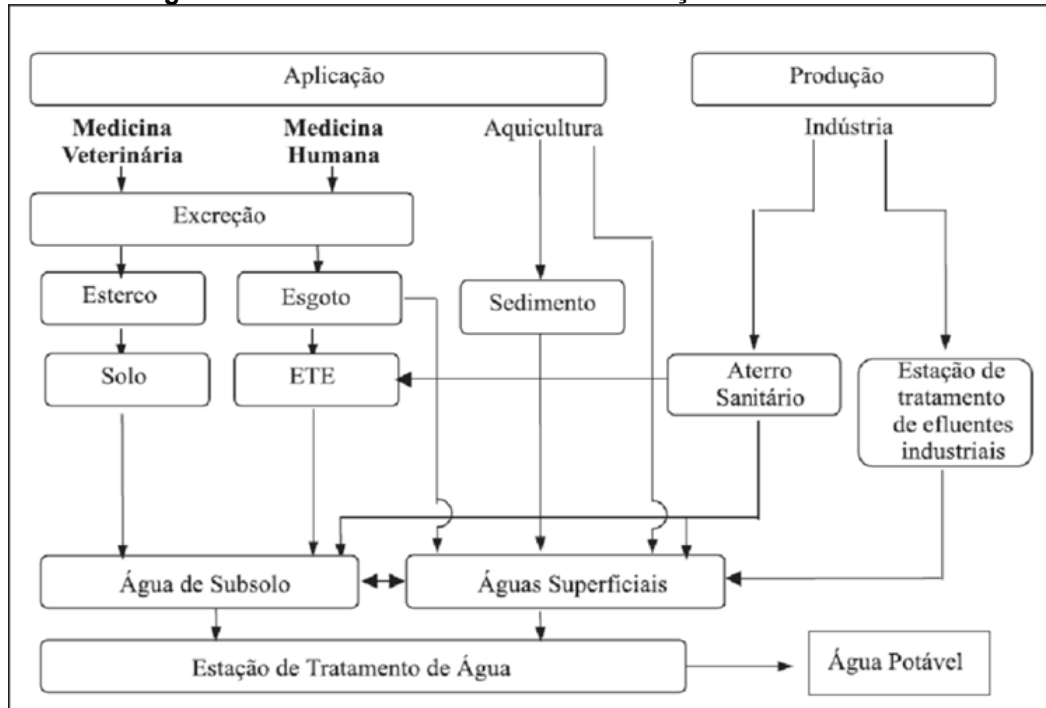
Fonte: Autoria própria (2025)

Segundo Jørgensen e Halling-Sørensen (2000) o caminho pelo qual os fármacos passam até atingirem os compartimentos ambientais, precisa ser cuidadosamente analisado, uma vez que sua origem precisa ser conhecida. É essencial monitorar o percurso dos medicamentos até o ambiente, pois é importante entender sua origem para avaliar os impactos da contaminação nos ecossistemas.

A Figura 1 apresenta um esquema que sugere possíveis caminhos para os fármacos, introduzidos no meio ambiente podendo atingir o ambiente aquático, existem aplicações que se distribuem em três campos, sendo estes a medicina veterinária, medicina humana e aquicultura. A última direciona as contaminações para os sedimentos e águas superficiais, enquanto as medicinas humanas e animal incorporam fármacos e posteriormente as excretas produzindo o esterco e o esgoto.

Consequentemente, acabam destinadas para solo e estações de tratamento que por sua vez entram em contato com a água do subsolo e por fim incidem sobre o tratamento de água.

Figura 1 - Possíveis rota dos fármacos lançados no Ambiente



Fonte: Bila; Dezotti (2003)

A produção representada pela atividade industrial divide-se em dois segmentos, sendo o aterro sanitário e a estação de tratamento de efluentes industriais, visto que do aterro sanitário é direcionado a água de subsolo e da estação de tratamento de efluentes industriais e ambos podem interagir com as águas de abastecimento (Bila; Dezotti, 2003).

3.2.1 Antibióticos como contaminantes ambientais

Os antibióticos são fármacos que revolucionaram o tratamento de doenças infecciosas causadas por bactérias e reduziram mundialmente as taxas de morbidade e mortalidade associadas a infecções bacterianas (Costa; Silva Junior, 2017).

Para Melo *et al.* (2009) a presença de determinados fármacos mesmo que em concentrações da faixa de nanogramas por litro (ng L^{-1}) a microgramas por litro ($\mu\text{g L}^{-1}$), podem gerar efeitos ecotoxicológicos nos ecossistemas.

O interesse crescente pelos antibióticos nos sistemas ambientais ocorre, principalmente, porque eles podem apresentar atividade biológica em concentrações muito baixas.

Para Halling-Sørensen *et al.* (1998) muitos dos antibióticos administrados não são plenamente metabolizados nos organismos, sendo excretados na urina e nas fezes, na forma do composto original ou parcialmente metabolizados. A contaminação dos ecossistemas contribui para o aumento da resistência bacteriana, e se tornam imunes aos efeitos das bactérias.

Conforme Regitano e Leal (2010) os antibióticos de uso veterinário, no geral, são representados por moléculas anfóteras, com vários grupos funcionais ionizáveis. O comportamento anfotérico também pode afetar a forma como esses antibióticos são distribuídos no organismo e como são excretados, o que pode ter implicações em sua presença no efluente.

De acordo com Reis Filho *et al.* (2007) o uso extensivo dessa categoria de fármaco, mais especificamente antibióticos, em amostras de efluentes de esgoto e corpos hídricos, além de outras matrizes, devido à enorme variedade de substâncias ecotoxicológicas e misturas complexas que devem ser efetivados para as classes comprovadamente mais tóxicas dos produtos de degradação e metabólitos gerados.

Conforme Leung *et al.* (2011), o desenvolvimento de resistência bacteriana aos antibióticos é um fenômeno natural que resulta da pressão seletiva exercida, devido à utilização inadequada destes fármacos com necessidade urgente de estratégias de uso dos antibióticos aumentando a resistência microbiana.

No Quadro 2 são apresentados dados de ocorrência de antibióticos nos compartimentos ambientais.

Quadro 2 - Principais antibióticos encontrados em matrizes ambientais

Antibiótico	Matriz ambiental	Concentração	Referências
Amoxicilina	Esgoto bruto	0,05 mg/L	Christian <i>et al.</i> (2003)
Ciprofloxacina	Água superficial	2,5 ng L ⁻¹	Locatelli; Sodré; Jardim (2011)
Tetraciclina	Água superficial, efluente sanitário bruto e efluente sanitário tratado	64 a 5,68 µg L ⁻¹	Agunbiade; Moodley (2014)
Tetraciclina	Água superficial	0,00014 a 0,01405 µg L ⁻¹	Li <i>et al.</i> (2008)
Ciprofloxacina	Esgoto em ETE	200 ng L ⁻¹	Golet <i>et al.</i> (2001)

Fonte: Autoria própria (2025)

Esses registros sugerem que os antibióticos, comumente usados em tratamentos médicos, são detectados em esgotos brutos, esgotos tratados e águas superficiais.

3.3 Processos eletrolíticos aplicados como tratamento

Os processos eletrolíticos são fundamentados na eletroquímica, que estuda a relação entre a energia elétrica e as reações químicas. Em um processo eletrolítico, uma corrente elétrica é usada para induzir uma ocorrência química não espontânea. Isso ocorre quando uma substância dissolvida ou fundida em um eletrólito é uma solução condutora de eletricidade que se decompõe em seus constituintes, com a ação da corrente elétrica (Nascimento *et al.*, 2021).

Assim, há dois tipos de aplicações durante a eletrólise: Ocorre uma reação redox, onde a oxidação acontece no ânodo (onde ocorre a perda de elétrons) e a redução ocorre no cátodo (onde ocorre o ganho de elétrons). Essas reações permitem que a eletricidade seja utilizada nas transformações químicas, como a separação de metais de seus minérios ou a decomposição de compostos químicos. Essas reações permitem que a eletricidade seja utilizada nas transformações químicas, tais como a separação de metais de seus minérios ou decomposição de compostos químicos (Nascimento *et al.*, 2021).

Conforme Chopra, Sharma e Kumar (2011) a tecnologia eletrolítica é um processo essencial e significativo para tratamento de águas residuais, monitoramento de remoção de contaminantes, esterilização de água. A eletrólise tem vantagens significativas, como seu equipamento simples, operação conveniente e não exigência de substâncias químicas para a sedimentação e geração de flocos.

3.3.1 Eletrocoagulação

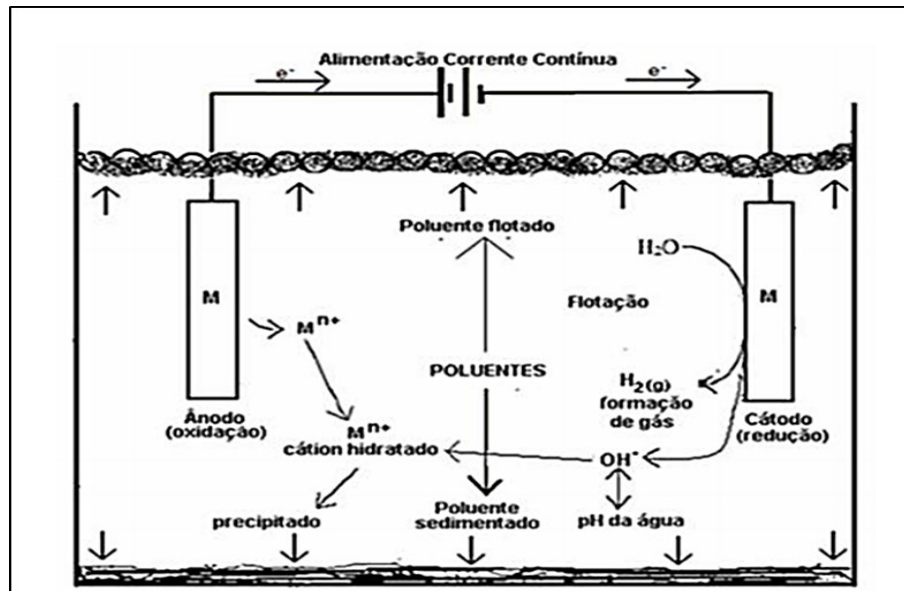
De acordo com Jaber *et al.* (2022), a eletrocoagulação é uma tecnologia eletroquímica que utiliza corrente elétrica através de eletrodos para remover poluentes de águas residuais, como corantes, materiais tóxicos, óleo, demanda química de

oxigênio e salinidade, sozinha ou combinada com outros processos em sistemas híbridos.

A eletrocoagulação se destaca como uma tecnologia eficiente e promissora para o tratamento de águas residuais, devido à sua capacidade de remover uma ampla gama de poluentes, com uso de corrente elétrica resultando com reações nos eletrodos que desestabilizam as partículas contaminadas, permitindo sua remoção eficaz.

A Figura 2 representa a eletrocoagulação em meio aquoso, na qual a corrente elétrica atua sobre os eletrodos produzindo espécies ativas que interagem com os poluentes.

Figura 2 - Processo de eletrocoagulação



Fonte: Valente (2012)

Conforme Aarfane *et al.* (2024) Os principais parâmetros que influenciam a eficiência do processo de eletrocoagulação são o pH inicial do efluente, densidade de corrente, tempo de operação, configuração do eletrodo (natureza, superfície, distância) e condutividade do efluente.

De acordo com Potrich (2019), diversas variáveis afetam o processo de eletrocoagulação, como: a densidade da corrente, o tempo da reação, o material do eletrodo, o pH inicial, a condutividade eletrolítica, e outros.

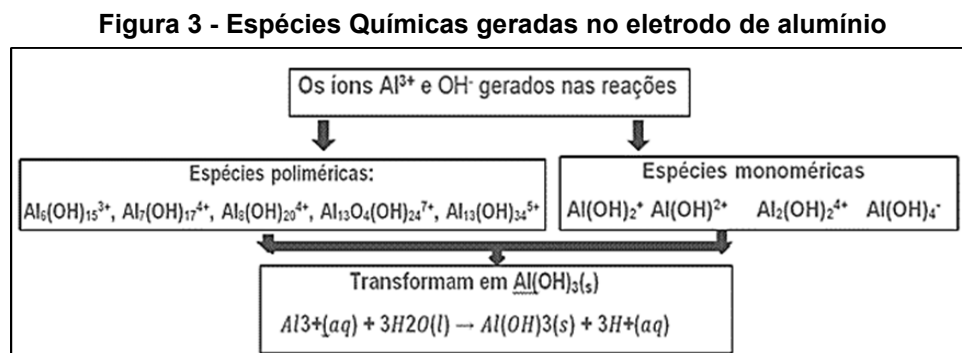
Conforme Cañizares *et al.* (2005), o princípio do método é passar eletricidade pela solução, para promover hidrólise de moléculas de água, por meio da aplicação de uma diferença de potencial nos eletrodos. Com isso há geração de gás hidrogênio

e o radical hidroxila, enquanto o ânodo sofre o processo de oxidação, gerando espécies catiônicas que são lançadas no meio.

Adapureddy e Goel (2012), destacam que o processo de eletrocoagulação provou ser eficaz na remoção de contaminantes da água potável, sendo identificados os mecanismos de coagulação, eletro-oxidação, eletroflotação, precipitação, adsorção e sedimentação.

A técnica de coagulação é um processo físico-químico complexo, com mecanismos que operam para a remoção de poluentes como: coloides, substâncias húmicas, e microrganismos refratários aos processos preliminares e primários e recalcitrantes aos processos secundários. (Souza, 2016, p. 21).

Durante o processo de eletrocoagulação as principais reações envolvidas são a união de íons gerados nas reações formando espécies monoméricas que se unem transformando em forma molecular conforme a Figura 3, onde são exemplificadas as espécies químicas geradas em eletrodo de alumínio.



Fonte: Cerqueira; Russo; Marques (2009)

O Al(OH)_3 formados na reação principal têm áreas superficiais, de rápida adsorção dos materiais orgânicos solúveis e para a contenção das partículas coloidais. Esses flocos são removidos facilmente por sedimentação ou flotação por ação do gás hidrogênio (Cerqueira; Russo; Marques, 2009).

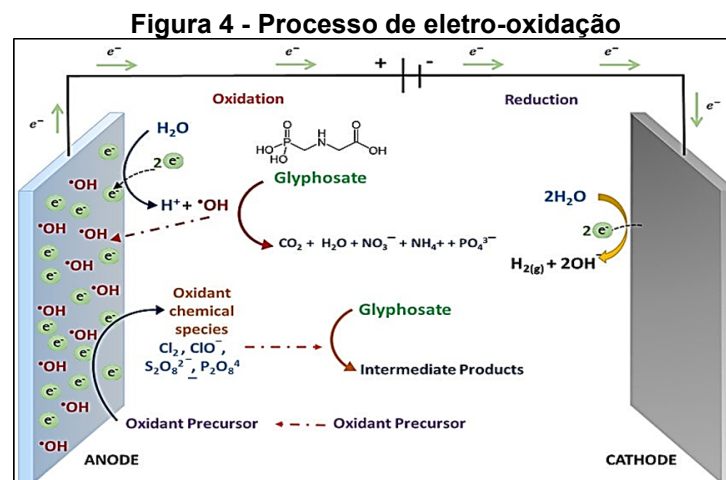
De acordo com Souza (2016), a eletrocoagulação é produzida por reações de oxidação e redução com a dissolução do ânodo, formando hidróxidos metálicos que promovem a remoção dos poluentes por neutralização de cargas. O tratamento por meio eletrocoagulação acontece através de reações de dissociação e ruptura nas cadeias moleculares mais complexas, desencadeando aplicação pela eletrólise e sua aplicabilidade.

Em algumas situações, quando empregados eletrólitos auxiliares como o cloreto de sódio, reações secundárias também ocorrem resultando em processos oxidativos que degradam moléculas orgânicas e aumentam a eficiência da eletrocoagulação que, além da remoção da adsorção e flotação, atua na oxidação química dos poluentes presentes (Nascimento *et al.*, 2021).

3.3.2 Eletro-oxidação

A eletro-oxidação é uma técnica da eletroquímica que utiliza na aplicação de intensidade da corrente elétrica para poder ocorrer a oxidação de contaminantes em uma solução. Esse processo envolve a transferência de elétrons entre os compostos presentes no meio dos eletrodos, resultando na destruição dessas substâncias e poluentes (Nascimento *et al.*, 2021).

Conforme Silva *et al.* (2018) a eletro-oxidação e a ozonização são processos utilizados para decompor e mineralizar substâncias que não foram completamente removidas pelos métodos tratamentos físico-químicos e biológicos. A eletro-oxidação e a ozonização são métodos eficientes para remover resíduos de poluentes em água e efluentes. A Figura 4 ilustra o processo de eletro-oxidação em uma célula eletroquímica, mostrando o ânodo (onde ocorre a oxidação), o cátodo (onde ocorre a redução), e o fluxo de elétrons e íons no sistema.

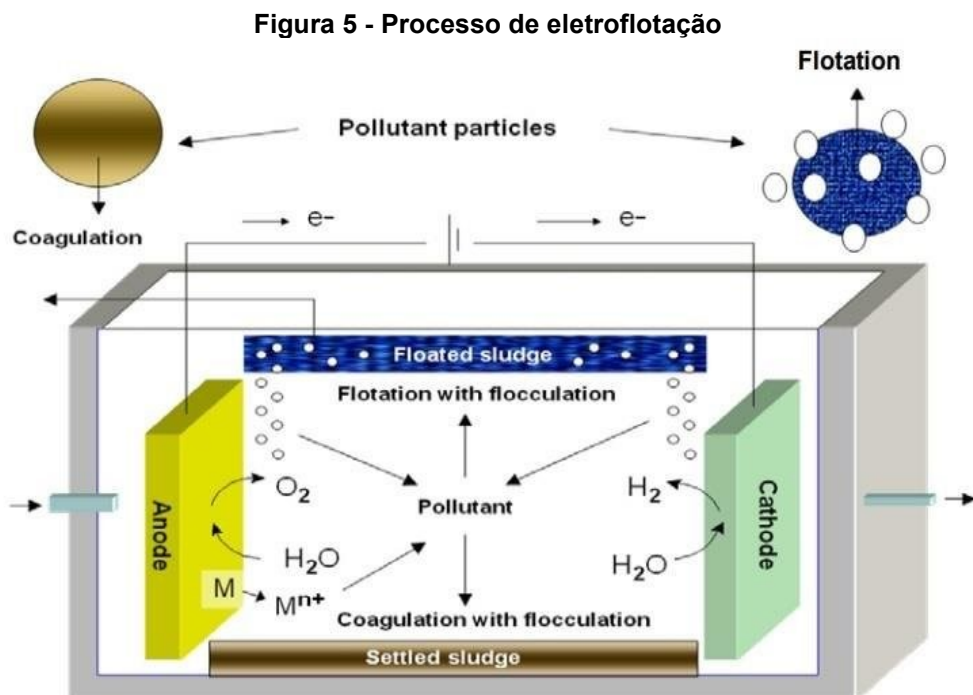


Diversos fatores influenciam a eficiência da eletro-oxidação, como a densidade da corrente, o tipo de eletrodo, a concentração de impurezas, a temperatura e o pH do meio.

De acordo com Nascimento *et al.* (2021) na oxidação anódica direta ocorre a transferência de carga entre a superfície do eletrodo e a molécula do poluente. Na troca de elétrons são capazes de oxidar poluentes orgânicos acima do potencial de evolução de oxigênio. A oxidação indireta ocorre com a geração de espécies com alto potencial de oxidação na superfície do eletrodo. Diversas espécies podem ser geradas durante o processo de eletro-oxidação, com destaque para as espécies.

3.3.3 Eletroflotação

Conforme Kyzas e Matis (2016) a flotação gera bolhas por ar disperso, essa técnica tem aplicações como águas, metais e resíduos biológicos, nesse processo como o campo elétrico e as bolhas finas de gás contribui para a reciclagem de subprodutos e resíduos, incluindo água. Na Figura 5 ilustra-se o processo de eletroflotação.



Fonte: Patel; Casbeer (2020)

A eletroflotação se baseia na aplicação de corrente elétrica em meio aquoso, onde os eletrodos bolhas de gás hidrogênio (H_2) no cátodo e oxigênio (O_2) no ânodo. Essas bolhas fazem o arrastes dos contaminantes que estão na solução e permitem a sua separação.

4 METODOLOGIA

A pesquisa realizada é de natureza qualitativa e bibliográfica e emprega como procedimento técnico um mapeamento sistemático. Essa metodologia visa identificar, analisar e sintetizar a produção científica sobre um tema específico, mapeando o estado atual do conhecimento, identificando tendências, lacunas e propondo para investigações futuras (Morosini; Nascimento; Nez, 2021).

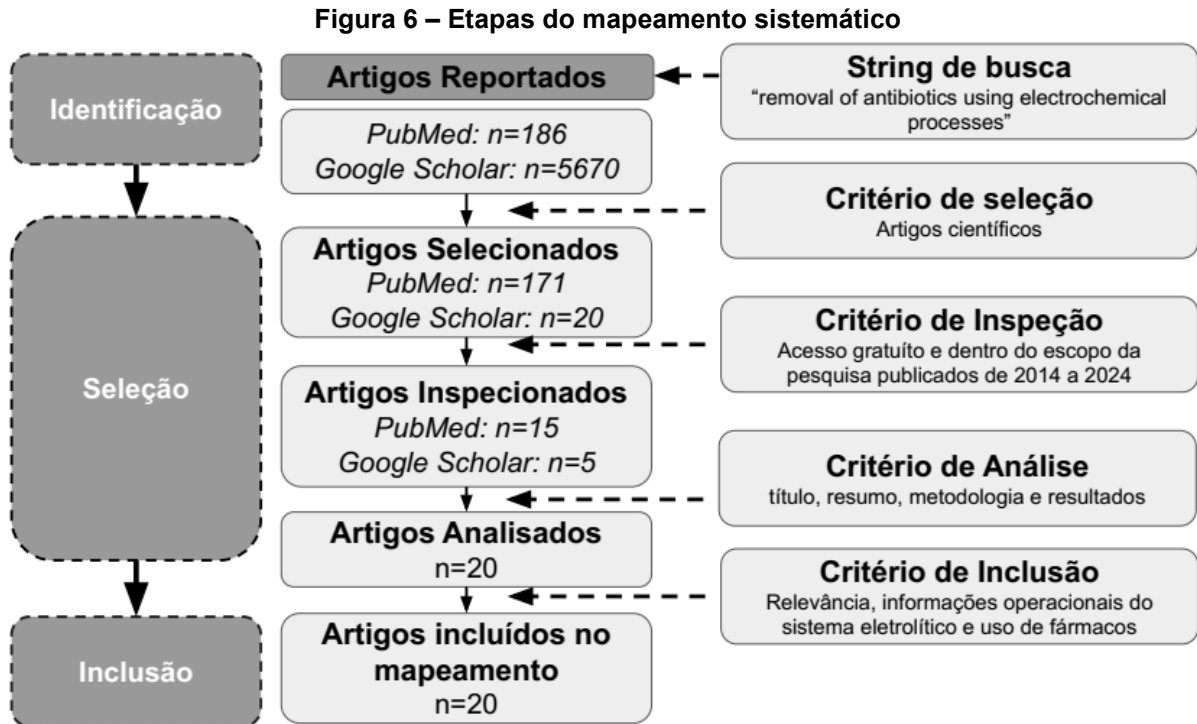
Para Motta *et al.* (2019) o mapeamento sistemático (MS) é um tipo de pesquisa que organiza e analisa os estudos primários existentes em uma área de conhecimento, com o objetivo de identificar tendências, lacunas úteis para futuro. Embora tenha uma abordagem aplicada, a pesquisa não é um estudo de campo, pois não envolve coleta de dados primários, mas se baseia na análise de dados secundários.

O objetivo de um mapeamento sistemático é realizar uma revisão estruturada da literatura, facilitando a identificação de lacunas e a proposta de novas questões de pesquisa. Essa abordagem é qualitativa, pois busca compreender profundamente os padrões observados, ao invés de quantificar dados.

De acordo com Cervo e Bervian (2002) essa metodologia se divide em etapas para mapeamento e levantamento bibliográfico, que tem por finalidade identificar as referências sobre um determinado tema, a partir do detalhamento rigorosos do percurso tomado pelo autor.

Nesta pesquisa foi realizado um mapeamento sistemático de literatura, em que foram considerados artigos científicos com o objetivo de responder a seguinte pergunta: Como tem ocorrido a aplicação de processos eletrolíticos na remoção de fármacos antibióticos em meio aquoso?

Na Figura 6 são apresentadas as etapas utilizadas na obtenção dos trabalhos pesquisados, nos critérios de inspeção, seleção, análise e inclusão do conjunto de artigos que compuseram a pesquisa de mapeamento sistemático. Posteriormente foram obtidos os dados e organizadas as informações.



Fonte: Autoria própria (2025)

4.1 Seleção das bases de dados

Nessa pesquisa foram utilizadas as bases de dados *PubMed* e o *Google Scholar*, pela facilidade em acesso, gratuidade e relevância do conjunto de periódicos, disponíveis a partir das mesmas.

O *Google Scholar* oferece facilidade de acesso e facilidade de navegação, sem a necessidade de inscrição ou assinatura para poder acessar a maioria dos artigos. Além disso, possibilita o acesso a uma variedade de publicações acadêmicas, incluindo artigos de periódicos.

O *PubMed* tem como foco as áreas de ciências da saúde e proporciona o acesso a estudos relacionados a tecnologias e tratamentos de água e resíduos, além disso, oferece acesso a artigos e periódicos científicos de revisão de alta qualidade.

4.2 Identificação dos artigos

Para identificação dos artigos nas bases anteriormente selecionadas, utilizaram-se na palavra de busca a string e que foi inserido nas ferramentas busca de

cada uma das bases investigadas. Considerando a questão de pesquisa, a string usada foi: *removal of antibiotics using electrochemical processes*.

4.3 Seleção, inspeção e análise inicial dos artigos

O primeiro procedimento de seleção considerou as publicações do tipo artigo científicos. Os trabalhos dessa tipologia foram recortados com base no período de publicação, estabelecido neste mapeamento como sendo compreendido de 2014 a 2024 (10 anos).

Posteriormente foram inspecionados quais destes artigos se enquadravam no escopo da pesquisa: processos eletrolíticos aplicados à remoção de antibióticos. Uma vez dentro desse escopo, foram aplicados critérios de análise baseados em:

- a) Relevância do Tema: Verificou-se se os artigos abordavam tópicos pertinentes ao campo de estudo, com foco nas questões investigadas.
- b) Metodologia: Analisou-se se a metodologia utilizada nos estudos era adequada ao tipo de pesquisa em andamento, seja qualitativa, quantitativa ou revisão de literatura. Além disso, considerou-se a robustez da metodologia, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados.
- c) Resultados e Conclusões: Verificou-se se as conclusões e resultados dos estudos eram relevantes e poderiam contribuir para o desenvolvimento do trabalho.

Após essa etapa, a partir desses critérios, ocorreu a exclusão dos artigos que não atendiam esses requisitos. O conjunto remanescente de trabalhos fez parte do mapeamento e usado na obtenção dos dados.

4.4 Análise detalhada e obtenção dos dados nos artigos selecionados

Na análise dos artigos selecionados, a primeira fase compreendeu a leitura minuciosa dos títulos e resumos. Esse procedimento foi essencial para determinar se os artigos de fato continham informações relevantes para responder à questão de pesquisa.

Na etapa seguinte, ocorreu a leitura do texto completo para a extração dos dados, referentes à:

- a) Tipos de fármacos antibióticos testados;
- b) Tipo de eletrólitos suporte;
- c) pH de trabalho;
- d) Tipo de eletrodo e material de composição;
- e) Tensões e correntes aplicadas;
- f) Eficiência de remoção.

4.5 Organização e apresentação dos resultados

Primeiramente, os artigos inclusos na pesquisa de mapeamento foram organizados em um banco de dados e codificados pela letra “A” seguida de dois algarismos que indicam a ordem de inclusão no banco. Por exemplo, o artigo A05 corresponde ao quinto trabalho admitido, com base nos critérios estabelecidos.

As informações extraídas dos artigos foram organizadas em tabelas e quadros para tratamentos e apresentadas em gráficos para discussão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A utilização da string de busca reportou 186 resultados na base *PubMed* e 5665 no *Google Scholar*. Após a aplicação do critério artigo científico o quantitativo de trabalhos foi reduzido para 171 e 20 respectivamente. Na etapa de inspeção, foram excluídos os artigos fora do escopo do mapeamento e após a análise inicial foram selecionados no mapeamento 15 artigos da base *PubMed* e 5 do *Google Scholar*, totalizando 20 trabalhos.

Quadro 3 - Conjunto de artigos utilizados no mapeamento sistemático

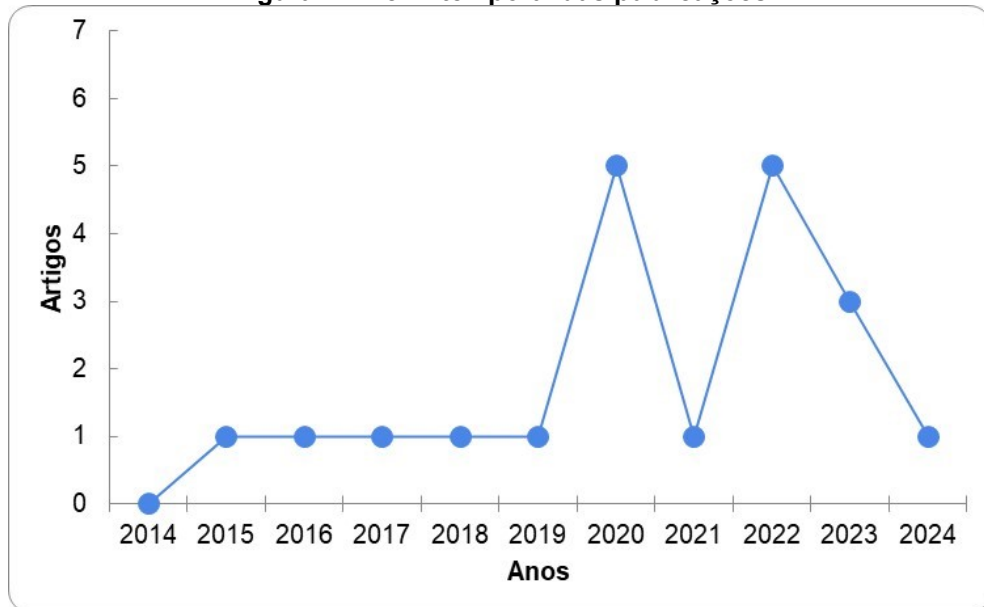
Artigo	Autores e ano	Título
A01	Gong <i>et al.</i> (2022)	Enhanced electrochemical removal of sulfadiazine using stainless steel electrode coated with activated algal biochar
A02	Zhang <i>et al.</i> (2021)	Study on the Electrochemical Removal Mechanism of Oxytetracycline by a Ti/IrO ₂ -Ta ₂ O ₅ Plate
A03	Guo <i>et al.</i> (2020)	Electrochemical removal of levofloxacin using conductive graphene/polyurethane particle electrodes in a three-dimensional reactor
A04	Dai <i>et al.</i> (2022)	Electrochemical degradation of antibiotic enoxacin using a novel PbO ₂ electrode with a graphene nanoplatelets inter-layer: Characteristics, efficiency and mechanism
A05	Droguett <i>et al.</i> (2020)	Treatment of antibiotic cephalexin by heterogeneous electrochemical Fenton-based processes using chalcopyrite as sustainable catalyst
A06	Hussain <i>et al.</i> (2017)	Photo-assisted electrochemical degradation of sulfamethoxazole using a Ti/Ru _{0.3} Ti _{0.7} O ₂ anode: Mechanistic and kinetic features of the process
A07	Köktaş <i>et al.</i> (2023)	Tetracycline removal from aqueous solution by electrooxidation using ruthenium-coated graphite anode
A08	Pan; Sun; Sun (2020)	Fabrication of multi-walled carbon nanotubes and carbon black co-modified graphite felt cathode for amoxicillin removal by electrochemical advanced oxidation processes under mild pH condition
A09	Felisardo <i>et al.</i> (2023)	Degradation of the antibiotic ciprofloxacin in urine by electrochemical oxidation with a DSA anode
A10	Wachter <i>et al.</i> (2019)	Optimization of the electrochemical degradation process of the antibiotic ciprofloxacin using a double-sided β -PbO ₂ anode in a flow reactor: kinetics, identification of oxidation intermediates and toxicity evaluation
A11	Frontistis; Mantzavinos; Meriç (2018)	Degradation of antibiotic ampicillin on boron-doped diamond anode using the combined electrochemical oxidation - Sodium persulfate process
A12	Zhang <i>et al.</i> (2022)	Removal of tetracycline from livestock wastewater by positive single pulse current electrocoagulation: Mechanism, toxicity assessment and cost evaluation
A13	Antonin <i>et al.</i> (2015)	Electrochemical incineration of the antibiotic ciprofloxacin in sulfate medium and synthetic urine matrix
A14	Sharan <i>et al.</i> (2023)	Bimetal-oxide (Fe/Co) modified bagasse-waste carbon coated on lead oxide-battery electrode for metronidazole removal
A15	Barişçi; Turkyay (2016)	Optimization and modelling using the response surface methodology (RSM) for ciprofloxacin removal by electrocoagulation
A16	Mokni <i>et al.</i> (2022)	Applicability of electrocoagulation process to the treatment of Ofloxacin and Chloramphenicol in aqueous media: Removal mechanism and antibacterial activity
A17	Arab; Faramarz; hashim (2022)	Applications of Computational and Statistical Models for Optimizing the Electrochemical Removal of Cephalexin Antibiotic from Water

A18	Shi <i>et al.</i> (2020)	Highly efficient removal of amoxicillin from water by three-dimensional electrode system within granular activated carbon as particle electrode
A19	Jumah <i>et al.</i> (2024)	Chemical structure dependent on electrochemical degradation of antibiotics using Boron-doped Diamond Electrodes
A20	Mostafaloo; Asadi-Ghalhari (2020)	Modeling and Optimization of the Electrochemical Process for Cefixime Removal from Water

Fonte: Aatoria própria (2025)

A partir desse conjunto de artigos foi realizada a extração de dados para a composição do mapeamento sistemático. Inicialmente foi traçado o panorama temporal das publicações. Na Figura 7 é apresentada a distribuição quantitativa dos artigos publicados ao longo dos últimos dez anos, de 2014 a 2024.

Figura 7 – Perfil temporal das publicações



Fonte: Aatoria própria (2025)

É possível observar uma tendência estável de 2015 a 2019, seguida por um crescimento na quantidade de artigos em 2020. Em 2021, houve uma redução na produção científica sobre esse tema, mas o número de publicações aumentou novamente em 2022, com uma novava diminuição em 2023 e 2024.

Outro parâmetro observado nas produções foi o tipo de processo eletrolítico empregado. A escolha dos processos e seus componentes influenciam nos mecanismos e reações que ocorrem nos sistemas. No Quadro 3 apresentam-se os artigos analisados, e os principais processos eletrolíticos abordados em cada estudo e na Figura 8 a distribuição percentual.

Quadro 4 - Processos eletrolíticos utilizados

Tipo de processo	Artigos	Quantidade
Degradação eletroquímica Foto-assistida	A06	1
Eletro- Fenton	A01, A05, A08, A13	4
Eletrocoagulação	A12, A15, A16, A17, A20	5
Eletro-oxidação	A04, A07, A10, A11	4
Foto Eletro-Fenton	A13	1
Oxidação anódica	A08	1
Oxidação – Eletroquímica	A02, A09, A13, A14, A19	5
Polimerização Oxidativa in situ	A03	1
Sistema de eletrodo tridimensional	A18	1

Fonte: Autoria própria (2025)

Considerando os tipos dos processos eletroquímicos nos 20 artigos analisados houve 23 menções de processos. Assim, observou-se que cinco artigos (A12, A15, A16, A17 e A20), ou seja 21,7% dos estudos empregaram o método de eletrocoagulação. Esse processo é uma das tipologias mais comumente utilizadas e uma técnica abrangente para a remoção e tratamento de diversos contaminantes. Nesses estudos a eletrocoagulação foi aplicada na remoção de antibióticos em água residual contendo os fármacos tetraciclina, ciprofloxacino, ofloxacino, cefalexina e cefixima.

O artigo de Zhang *et al.* (2022) (A12) aplicou o processo de eletrocoagulação sob a justificativa de ser uma técnica acessível, simples e de baixo custo para o tratamento de águas residuais da pecuária. Nesse estudo ocorreu a remoção da tetraciclina. De acordo com Barişçi *et al.* (2016) (A15) a aplicação da eletrocoagulação utilizada na remoção da CIP foi satisfatória. Neste artigo, os autores realizaram a otimização e a avaliação dos efeitos das variáveis do processo de eletrocoagulação, sendo estas a densidade de corrente que foi aplicada, o tempo de duração do processo, a concentração inicial e o pH.

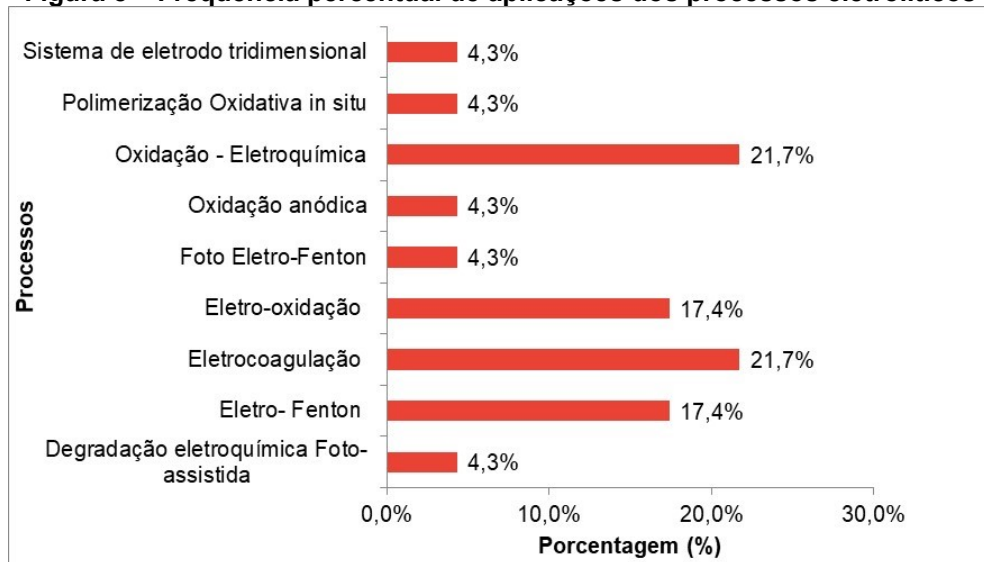
A aplicação de processos de oxidação eletroquímica, também apresentou percentual de ocorrência em 21,7% dos artigos utilizados no mapeamento sistemático (Figura 8). Os artigos A02, A09, A13, A14 e A19 (Quadro 4) aplicaram a oxidação eletroquímica em águas residuárias contendo os fármacos oxitetraciclina, ciprofloxacina, metronidazol e estreptomicina.

Em relação a técnica de eletro-Fenton, ela esteve presente em quatro trabalhos (A01, A05, A08, A13) e foi aplicada na remoção de sulfadiazina, cefalexina, amoxicilina e ciprofloxacina perfazendo 17,4% dos artigos. Outros quatro estudos

(A04, A07, A10 e A11) compreenderam os 17,4% das pesquisas em que foi utilizado o processo de eletro-oxidação destinado a remoção de antibióticos como a enoxacina, tetraciclina, ciprofloxacina e a ampicilina.

Os percentuais restantes (21,8%) corresponderam a um artigo apenas para cada um dos demais processos, sendo estes a degradação eletroquímica foto-assistida (A06), a fotoeletro-Fenton (A13), a oxidação anódica (A08), a polimerização oxidativa (A03) e o sistema de eletrodo tridimensional (18). Estes trabalhos empregaram a remoção dos fármacos sulfametoxazol, ciprofloxacina, amoxicilina e levofloxacino.

Figura 8 – Frequência percentual de aplicações dos processos eletrolíticos



Fonte: Autoria própria (2025)

Considerando o escopo do mapeamento realizado, foi observado nos artigos quais eram os antibióticos testados em termos de remoção (Quadro 5).

Quadro 5 – Antibióticos testados na aplicação de processos eletrolíticos

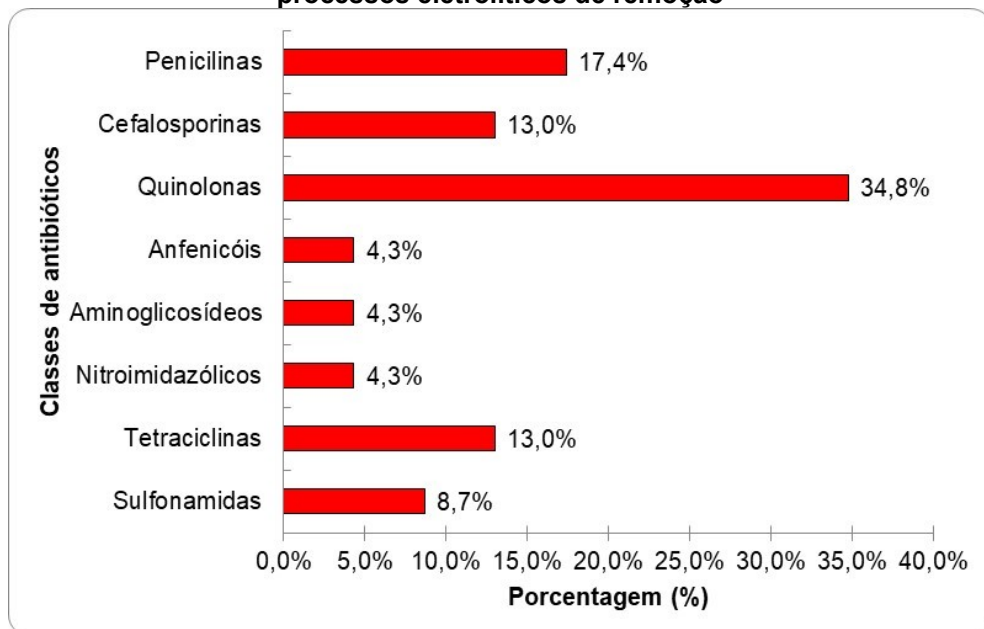
Antibiótico	Classe	Artigos	Quantidade
Amoxicilina	Penicilinas	A08, A18, A19	3
Ampicilina	Penicilinas	A11	1
Cefalexina	Cefalosporinas	A05, A17	2
Cefixima	Cefalosporinas	A20	1
Ciprofloxacino	Quinolonas	A09, A10, A13, A15, A19	5
Cloranfenicol	Anfenicóis	A16	1
Enoxacina	Quinolonas	A04	1
Estreptomina	Aminoglicosídeos	A19	1
Levofloxacino	Quinolonas	A03	1
Metronidazol	Nitroimidazólicos	A14	1
Ofloxacina	Quinolonas	A16	1
Oxitetraciclina	Tetraciclina	A02	1

Sulfadiazina	Sulfonamidas	A01	1
Sulfametoxazol	Sulfonamidas	A06	1
Tetraciclina	Tetraciclinas	A07, A12	2

Fonte: Aatoria própria (2025)

A aplicação de processos eletrolíticos para a remoção de antibióticos pode apresentar resultados tanto positivos quanto negativos, dependendo do grupo químico presente na estrutura desses fármacos. Neste estudo foram reportados artigos envolvendo o uso de processos eletrolíticos para remoção de quinze antibióticos pertencentes à oito classes diferentes (Figura 9).

Figura 9 - Frequência percentual das principais classes de antibióticos em estudos envolvendo processos eletrolíticos de remoção



Fonte: Aatoria própria (2025)

Ao examinar esses dados do (Quadro 4) e (Quadro 5), foi possível identificar melhores remoções para antibióticos como oxitetraciclina e ciprofloxacino, em comparação a outros fármacos, como levofloxacino e amoxicilina, que exigiram mais tempo e esforço para alcançar resultados semelhantes.

Considerando os antibióticos utilizados nos estudos, a ciprofloxacina foi o mais frequente, estando presente em cinco artigos (A09, A10, A13, A15 e A19), quadro 5. Esse fármaco se destaca por ser um antibiótico mais barato e mais acessível para realizar os testes de tratamento, e por isso encontra-se com maior frequência em estudos envolvendo metodologias de tratamentos para fármacos antibióticos. A classe

das quinolonas, da qual a ciprofloxacina faz parte, é o grupo de antibióticos mais estudado em processos eletrolíticos (34,8%) (Figura 9). Nessa classe estão incluídas a enoxacina (A04), levofloxacino (A03) e a ofloxacina (A16).

A classe das penicilinas esteve presente em 17,4% dos trabalhos (Figura 9). A amoxicilina foi a penicilina mais comumente estudada, sendo utilizada em três artigos (A08, A18 e A19). A ampicilina foi reportada apenas em um estudo (A11) (Figura 8). Para o grupo das tetraciclinas (13,0%) foram avaliados o antibiótico à classe das tetraciclinas em dois trabalhos (A07 e A12) e a oxitetraciclina no artigo A02.

Outros três estudos (A05, A17 e A20) avaliaram a remoção de antimicrobianos da classe da cefalosporinas (13%). Foram testadas a cefalexina (A05 e A17) e a cefixima (A20). Os demais trabalhos realizaram estudos de processos eletrolíticos aplicados à antibióticos dos grupos dos anfenicóis (Cloranfenicol, A16), dos aminoglicosídeos (estreptomicina, A19) e dos nitroimidazólicos (metronidazol, (A14), Quadro 5 .

O tipo de eletrodo utilizado nos sistemas eletrolíticos tem relação com os mecanismos e processos que ocorrem durante a sua operação. Assim, no mapeamento sistemático foram extraídos dados referentes aos eletrodos aplicados nas pesquisas dessa natureza (Quadro 6).

O levantamento realizado permitiu verificar diferentes tipos de eletrodos aplicados nas pesquisas envolvendo processos eletrolíticos para remoção de antibióticos. Em termo de composição foram observados doze materiais distintos. Os dados mostram uma variedade de eletrodos com diferentes composições e propriedades, utilizadas em diferentes contextos de pesquisa (Quadro 6).

A diversidade de materiais também sugere que há um campo dinâmico e em evolução no uso de eletrodos, com pesquisa contínua sobre novas combinações e modificações para melhorar o desempenho e a eficiência desses materiais. Considerando os tipos de eletrodos foram determinados 15 tipos, dos quais o mais frequente, reportado em quatro artigos (A12, A16, A17 e A20) foi o eletrodo de alumínio.

Quadro 6 - Tipos de eletrodos aplicado em sistemas eletrolíticos para remoção de antibióticos

Tipos de eletrodos	Artigos	Quantidade
Eletrodo de Biochar de algas pirolisado (catódico)	A01	1
Ânodo de Ti/IrO ₂ - Ta ₂ O ₅ (Titânio recoberto com óxidos metálicos)	A02	1

CPU/PPy/Gr (eletrodo de grafeno e polímero)	A03	1
Ânodo de GNP-PbO ₂ (grafeno e óxido de chumbo modificado com grafeno)	A04	1
Ânodo de IrO ₂ (óxido de irídio com catalisador de calcopirita)	A05, A06	2
Ânodo de grafite revestido com Ru (óxido de ródio)	A07	1
MWCNTs-CB/GF (Nanotubos de carbono e grafite)	A08	1
Ânodo DSA (Ti/IrO ₂) e Cátodo: Aço inoxidável	A09	1
Ânodo Ti-Pt/ β -PbO ₂ (dupla face)	A10	1
Eletrodo de diamante dopado com boro (BDD)	A11, A13, A19	3
Alumínio (Al)	A12, A16, A17, A20	4
Platina (Pt)	A13	1
Eletrodo Fe ₁₂ -bwc/LBE (modificado com nanopartículas de óxido bimetálico Fe e Co sobre carbono de resíduos de bagaço)	A14	1
Ferro (Fe)	A15	1
Eletrodos tridimensional (3DES), ânodo e cátodo, carvão ativado granular (GAC)	A18	1

Fonte: Autoria própria (2025)

Outros três estudos (A11, A13 e A19) empregaram eletrodo de diamante dopado com boro e dois artigos usaram ânodo de IrO₂ (óxido de irídio com catalisador de calcopirita) (A05 e A06). Os demais tipos observados foram reportados em apenas um trabalho cada um deles.

Além do eletrodo, a aplicação de eletrólitos suporte faz-se necessária para a melhorar a condutibilidade nos sistemas eletrolíticos e assim, potencializar a remoção do analito de interesse. No Quadro 7 são listadas as espécies químicas empregadas dos estudos compreendidos neste mapeamento sistemático.

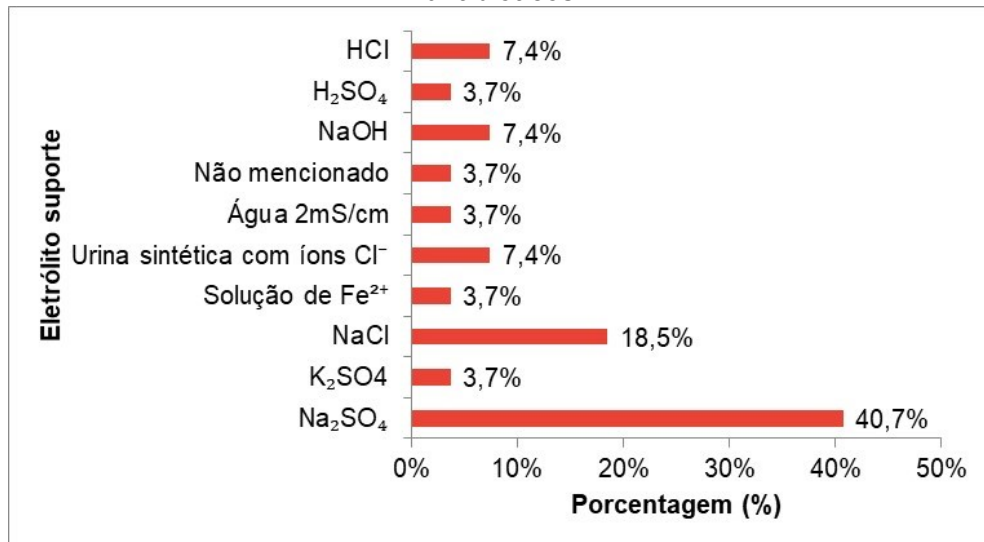
Quadro 7 – Tipos de eletrólitos suporte aplicados em sistemas eletrolíticos para remoção de antibióticos

Tipos de Eletrólitos	Artigos	Quantidade
Na ₂ SO ₄	A01, A02, A03, A04, A05, A07, A10, A11, A13, A14, A19	11
K ₂ SO ₄	A04	1
NaCl	A06, A16, A17, A18, A20	5
Solução de Fe ²⁺	A08	1
Urina sintética, contendo íons cloreto (Cl ⁻)	A09, A13	2
Água residual com condutividade de 2mS/cm	A12	1
Não Mencionado	A15	1
NaOH	A17, A20	2
H ₂ SO ₄	A17	1
HCl	A17, A20	2

Fonte: Autoria própria (2025)

O eletrólito mais usado com diferentes concentrações foi o sulfato de sódio (Na₂SO₄), presente em onze artigos (A01, A02, A03, A04, A05, A07, A10, A11, A13, A14 e A19), resultando em 40,7 % de frequência nas publicações (Figura 10).

Figura 10 - Frequência percentual dos tipos de eletrólitos suporte utilizados para a remoção de antibióticos



Fonte: Autoria própria (2025)

O uso frequente de Na₂SO₄ aparece associado a diversas combinações, destacando sua eficácia no processo. Outros eletrólitos como NaCl também são aplicados, indicando suas potencialidades em sistemas de remoção. Além disso, eletrólitos mais especializados, como solução de Fe²⁺ para reação de Fenton, urina sintética e misturas de NaOH, H₂SO₄ e HCl, são utilizados em estratégias mais complexas para otimizar a remoção de antibióticos.

Cinco estudos em preparam NaCl (A06, A16, A17, A18 e A20), resultando em 18,5% de frequência percentual nos estudos. A urina sintética, contendo íons cloreto (Cl⁻) foi aplicada em dois artigos (A09 e A13), assim como o NaOH (A17 e A20) e o HCl (A17 e A20). Os demais eletrólitos foram reportados em apenas um estudo.

O pH de um sistema eletrolítico também é uma variável que influencia diretamente a remoção de compostos orgânicos como os antibióticos. No Quadro 8 foram agrupadas faixas de pH verificadas nos artigos investigados.

Quadro 8 - Faixa de PH aplicadas em sistemas eletrolíticos para remoção de antibióticos

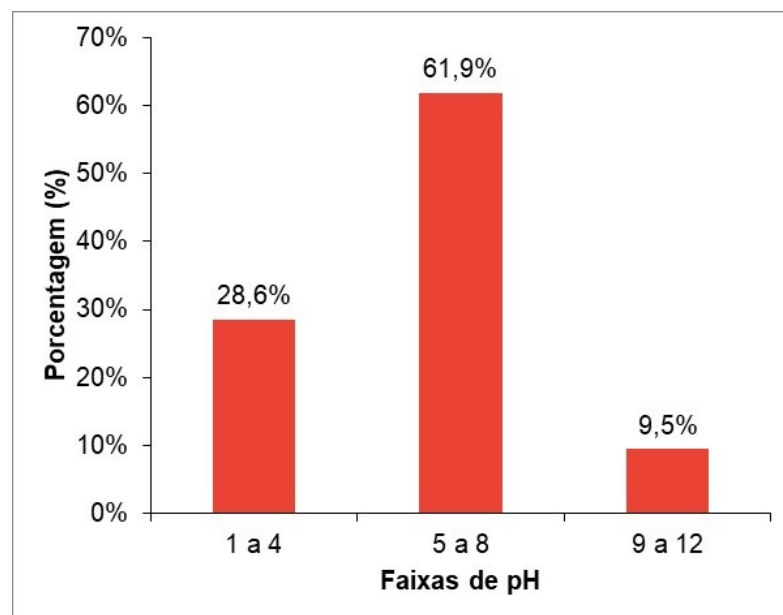
Faixa de pH	Artigos	Quantidade
1 a 4	A01, A02, A05, A12, A13, A15	6

5 a 8	A03, A04, A06, A07, A08, A09, A11, A14, A16, A17, A18, A19, A20	13
9 a 12	A10, A19	2

Fonte: Autoria própria (2025)

A análise geral informa que a variável pH é amplamente explorada em processos eletrolíticos, variando de 3 a 11,2 (Quadro 8). A estreptomicina foi o antibiótico em que o estudo ocorreu no pH mais alcalino (11,2). O pH mais ácido (3) foi avaliado na remoção dos fármacos sulfadiazina e oxitetraciclina.

Figura 11 - Frequência percentual das faixas de pH utilizados para a remoção de antibióticos



Fonte: Autoria própria (2025)

A mais recorrente foi a dos estudos utilizando pH entre 5 e 8 (A03, A04, A06, A07, A08, A09, A11, A14, A16, A17, A18, A19 e A20), totalizando treze publicações, o que corresponde a 61,9% (Figura 11). Posteriormente, foram verificados seis estudos na faixa de 1 a 4 (A01, A02, A05, A12, A13 e A15) e duas pesquisas (A10 e A19) realizadas na faixa alcalina de 9 a 12.

Cada artigo analisado revelou diversidade de condições experimentais e resultados de remoção para os diferentes antibióticos por meio de processos eletrolíticos, com eficiências de remoção variando de 72% a 100% dependendo das condições experimentais.

Os dados sugerem que a escolha do tipo de eletrodo, a densidade de corrente, o pH, e o tempo de tratamento são fundamentais para otimizar a remoção de antibióticos e melhorar a viabilidade dos processos em condições práticas.

As eficiências de remoção reportadas sugerem que os processos de oxidação eletroquímica, oxidação fotoeletroquímica e eletro-Fenton podem ser altamente eficazes na degradação e mineralização de contaminantes orgânicos como os antibióticos.

No entanto, fatores como o tempo de tratamento, consumo de energia, e efeitos colaterais (como a formação de subprodutos indesejáveis) devem ser cuidadosamente controlados para otimizar o desempenho do sistema de tratamento.

Para a avaliação das eficiências apresentadas nos artigos, os dados foram organizados em três faixas (Quadro 9).

Quadro 9 - Eficiência de remoção dos sistemas eletrolíticos para remoção de antibióticos

Faixa de Eficiência	Artigos	Quantidade
70 a 80%	A06, A10, A16	3
81 a 90%	A03, A04, A15, A19, A20	5
91 a 100%	A01, A02, A05, A07, A08, A09, A11, A12, A13, A14, A17, A18, A19	13

Fonte: Autoria própria (2025)

Os dados indicam que, na maioria dos estudos envolvendo aplicação dos processos eletrolíticos na remoção de antibióticos, as eficiências situam-se de 91% a 100%, conforme verificado em treze artigos (A01, A02, A05, A07, A08, A09, A11, A12), A13, A14, A17, A18 e A19, quadro 9). Nessas pesquisas foram aplicados os antibióticos: sulfadiazina, oxitetraciclina, cefalexina, tetraciclina, amoxicilina, ciprofloxacina, ampicilina, metronidazol e estreptomicina.

Para a faixa de 81% a 90%, foram identificados cinco trabalhos (A03, A04, A15, A19, A20), nos quais ocorreu a remoção de levofloxacino, enoxacina, ciprofloxacina e cefixima. Quanto as remoções com variação entre 70 e 80%, estas foram reportadas em três artigos (A06), A10, A16) para os antibióticos: sulfametoxazol, ciprofloxacina e cloranfenicol, quadro 9.

Retomando-se a questão que norteou o mapeamento sistemático: Como tem ocorrido a aplicação de processos eletrolíticos na remoção de fármacos antibióticos em meio aquoso? É possível considerar que existem vantagens e desvantagens na utilização deles.

Métodos como Eletro-Fenton e Foto-Eletro-Fenton oferecem alta eficiência, gerando radicais altamente reativos para remover compostos como os antibióticos, porém, com custos elevados e dependência de condições controladas como pH e corrente elétrica.

A oxidação eletroquímica e a eletro-oxidação são mais simples e de menor custo, mas podem ser menos eficazes para compostos estáveis gerando subprodutos indesejáveis. Técnicas como a eletrocoagulação e a oxidação anódica também são simples e econômicas, porém têm limitações na remoção de medicamentos dissolvidos e podem gerar resíduos. Por fim, o sistema de eletrodo tridimensional melhora a eficiência com maior área de reação, mas exige um design complexo e pode sofrer desgaste nos eletrodos.

De forma geral, as pesquisas têm testado os processos eletrolíticos e fotoeletroquímicos, no entanto, o principal desafio dessas tecnologias é o alto custo operacional, quando comparadas com processos menos dispendiosos, como a adsorção, por exemplo. o que limita sua aplicação em larga escala. Embora os processos eletrolíticos isolados também apresentem bons resultados na eliminação de produtos farmacêuticos do grupo dos antibióticos, a combinação de diferentes métodos pode melhorar a eficiência.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O mapeamento sistemático dos artigos que abordam a aplicação de processos eletrolíticos na remoção de fármacos antibióticos permite entender qual é o panorama de prospecção de tecnologias de tratamentos avançados baseadas nos mesmos. Foram observados estudos com diversas classes de antibióticos, os quais conseguem ter eficiência de remoção na faixa de 70 a 100%.

Diversos tipos de eletrodos podem ser aplicados nos processos eletrolíticos, desde estruturas simples, como aqueles constituídos de ferro e alumínio à eletrodos sofisticados compostos de nanomateriais e metais mais nobres, conforme demonstrado nos diversos artigos que foram mapeados.

Os parâmetros operacionais são particulares de cada estudo e dificultam comparações. Nos estudos verificaram-se diferentes intensidades de corrente elétrica, variações amplas de pH e variedade de eletrólitos suporte.

Considerando que o objetivo deste estudo foi realizar um mapeamento sistemático sobre a remoção de antibióticos utilizando os processos eletrolíticos pode-se concluir que por meio da pesquisa realizada foram evidenciadas diferentes abordagens nos artigos do *PubMed* e *Google Scholar*. Além disso, o campo dos processos eletrolíticos e suas combinações pode ser considerado espaço para pesquisas futuras visando explorar suas potencialidades na área dos tratamentos avançados aplicados a contaminantes farmacológicos como os antibióticos.

REFERÊNCIAS

AARFANE, A.; BENSEMLALI, M.; ELMELOUKY, A.; HATIMI, B.; ZAIM, S.;
RENAULT, N. J.; BARAKET, A.; ERRACHID, A.; MOHAMED, M.; NASRELLAH, H.

Electrocoagulation efficiency probed using electrochemical impedance spectroscopy. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 75, p. 266-273, 2024.

ADAPUREDDY, S. M.; GOEL, S. Optimizing electrocoagulation of drinking water for turbidity removal in a batch reactor. **International Proceedings of Chemical, Biological and Environmental Engineering (IPCBE)**, v. 30, p. 97-102, 2012.

AGUNBIADE, F.; MOODLEY, B. Pharmaceuticals as emerging organic contaminants in Umgeni River water system, KwaZulu-Natal, South Africa. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 186, n. 11, p. 7273-7291, 2014.

ANTONIN, V. S.; SANTOS, M. C.; GARCIA-SEGURA, S.; BRILLAS, E. Electrochemical incineration of the antibiotic ciprofloxacin in sulfate medium and synthetic urine matrix. **Water Research**, v. 83, p.31-41, 2015.

ARAB, M.; FARAMARZ, M. G.; HASHIM, K. Applications of Computational and Statistical Models for Optimizing the Electrochemical Removal of Cephalexin Antibiotic from Water. **Water**, v. 14, n. 3, p. 344, 2022.

BARIŞÇI, S.; TURKAY, O. Optimization and modelling using the response surface methodology (RSM) for ciprofloxacin removal by electrocoagulation. **Water Science & Technology**, V. 73, n. 7, p. 1673-1679, 2016.

BILA, D.; DEZOTTI, M. Fármacos no Meio Ambiente. **Química Nova**, v. 26, n. 4, p.523-530, 2003.

CAMPANHA, M. C.; AWAN, A. T.; SOUSA, D. N. R. de; GROSSELI, G. M.; MOZETO, A. A.; FADINI, P. S. A 3- year study on occurrence of emerging contaminants in an urban stream of São Paulo State of Southeast Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 10, p. 7936-47, 2015.

CAÑIZARES, P.; CARMONA, M.; LOBATO, J.; MARTÍNEZ, F.; RODRIGO, M. A. Electrodissolution of aluminum electrodes in electrocoagulation processes. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 44, n. 12, p. 4178-4185, 2005.

CERQUEIRA, A.; RUSSO, C.; MARQUES, M. R. C. Electroflocculation for textile wastewater treatment. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 26, p. 659-668, 2009.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. **Metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002.

CHOPRA, A. K.; SHARMA, A. K.; KUMAR, V. Overview of Electrolytic treatment: An alternative technology for purification of wastewater. **Archives of Applied Science Research**, v. 3, n. 5, p. 191-206, 2011.

COSTA, A. L. P.; SILVA JUNIOR, A. C. S. Resistência bacteriana aos antibióticos e Saúde Pública: uma breve revisão de literatura. **Estação Científica (UNIFAP)**, v. 7, n. 2, p. 45-57, 2017.

CHRISTIAN, T.; SCHNEIDER, R.J.; FÄRBER, H.A.; SKUTLAREK, D.; MEYER, M.T.; GOLDBACH, H.E. Determination of antibiotic residues in manure, soil, and surface waters. **Acta Hydrochimica et Hydrobiologica**, v. 31, n. 1, p.36-44, 2003.

DAI, J.; FENG, H.; SHI, K.; MA, X.; YAN, Y.; YE, L.; XIA, Y. Electrochemical degradation of antibiotic enoxacin using a novel PbO₂ electrode with a graphene nanoplatelets inter-layer: Characteristics, efficiency and mechanism. **Chemosphere**, v. 307, n. 2, p. 135833, 2022.

DROGUETT, C. SALAZAR, R.; BRILLAS, E.; SIRÉS, I.; CARLESÍ, C.; MARCO, J. F.; THIAM, A. Treatment of antibiotic cephalexin by heterogeneous electrochemical Fenton-based processes using chalcopyrite as sustainable catalyst. **Science of The Total Environment**, v. 740, p. 140154, 2020.

ESCHER, M. A. S. AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P.; TORRES, N. H. FERREIRA, L. F. R. A problemática ambiental da contaminação dos recursos hídricos por fármacos. **Brazilian Journal of environmental sciences**. v. 51, p. 141-148, 2019.

ESPINOZA-MONTERO, P. J.; VEGA-VERDUGA, C.; ALULEMA-PULLUPAXI, P.; FERNÁNDEZ, L.; PAZ, J. L. Technologies Employed in the Treatment of Water Contaminated with Glyphosate: A Review; **Molecules**, v. 25, n. 23, p. 5550, 2020.

FELISARDO, R. J. A.; BRILLAS, E.; FERREIRA, L. F. R.; CAVALCANTI, E. B.; GARCIA-SEGURA, S. Degradation of the antibiotic ciprofloxacin in urine by electrochemical oxidation with a DSA anode. **Chemosphere**, v. 344, p. 140407, 2023.

FRONTISTIS, Z.; MANTZAVINOS, D.; MERIÇ, S. Degradation of antibiotic ampicillin on boron-doped diamond anode using the combined electrochemical oxidation - Sodium persulfate process. **Journal of Environmental Management**, v. 223, p. 878-887, 2018.

GONG, Z.; WANG, H.; VAYENAS, D. V.; YAN, Q. Enhanced electrochemical removal of sulfadiazine using stainless steel electrode coated with activated algal biochar. **Journal of Environmental Management**, v. 306, p. 114535, 2022.

GOLET, E. M.; HARTMANN, A.; TERNES, T. A.; GIGER, W.; Trace Determination of Fluoroquinolone Antibacterial Agents in Urban Wastewater by Solid-Phase Extraction and Liquid Chromatography with Fluorescence Detection. **Analytical Chemistry**, v. 73, n. 15, p. 3632–3638, 2001.

GUO, C.; LIU, H.; WANG, C.; ZHAO, J.; ZHAO, W.; LU, N.; QU, J.; YUAN, X.; ZHANG, Y. Electrochemical removal of levofloxacin using conductive graphene/polyurethane particle electrodes in a three-dimensional reactor. **Environmental Pollution**. v. 260, p. 114101, 2020.

HALLING-SØRENSEN, B.; NIELSEN, S. N.; LANZKY, P. F.; INGERSLEV, F.; LÜTZHOFT, H. C. H.; JØRGENSEN, S. E. Occurrence, fate and effects of pharmaceuticals in the environment. A review. **Chemosphere**, v. 36, n. 2, p. 357-393, 1998.

HORONZI, A. A. M.; SCHUTZ, F. C. A.; BUSARELLO, C. J.; MENDONÇA, S. N. T. G. de; SCHMIDT, C. A. P. Necessidade de água potável como estudo da crise mundial e suas descobertas. **Brazilian Journal of Development**. v. 6, n. 12, p.100881-100886, 2020.

HUSSAIN, S.; STETER, J. R.; GUL, S.; MOTHEO, A. Photo-assisted electrochemical degradation of sulfamethoxazole using a Ti/Ru_{0.3}Ti_{0.7}O₂ anode: Mechanistic and kinetic features of the process. **Journal of Environmental Management**, v. 201, p. 153-162, 2017.

JARBERI, F. Y. A.; ALARDHI, S. M.; AHMED, S. A.; SALMAN, A. D.; JUZSAKOVA, T.; CRETESCU I.; LE, P. C.; CHUNG, W. J.; CHANG S. W.; NGUYEN D. A tecnologia de eletrocoagulação pode ser integrada aos sistemas de tratamento de águas residuais para melhorar a eficiência do tratamento? *Pesquisa Ambiental*. v. 214, P. 2, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935122012178?via%3Dihub>. Acesso em 20 fev 2025.

JØRGENSEN, S. E.; HALLING-SØRENSEN, B. Drugs in the environment. **Chemosphere**. v. 40, n. 7, p. 691-699, 2000.

JUMAH, R.; ALSALMAN, S.; JUM'H, I.; AL-ADDOUS, M.; HRAHSHEH, F.; GHANEM, H.; ROSIWAL, S.; TELFAH, A. Chemical structure dependent electrochemical degradation of antibiotics using Boron-doped Diamond Electrodes. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 12, n. 6, p. 114115, 2024.

KÖKTAŞ, I. K.; GÖKKUŞ, Ö.; KARIPER, I. A.; OTHMANI, A. Tetracycline removal from aqueous solution by electrooxidation using ruthenium-coated graphite anode. **Chemosphere**, v. 315, p. 137758, 2023.

KYZAS, G.; MATIS, K. Electroflotation process: A review. **Journal of Molecular Liquids**, v. 220, p. 657-664, 2016.

LEUNG, E., WEIL, D. E.; RAVIGLIONE, M.; NAKATANI, H. The WHO policy package to combat antimicrobial resistance. **Bull World Health Organ**. v. 89, p. 3090-392, 2011.

LI, K.; YEDILER, A; YANG, M.; SCHULTE-HOSTEDE, S.; WONG, M. H. Ozonation of oxytetracycline and toxicological assessment of its oxidation byproducts. **Chemosphere**, v. 72, n. 3, p. 473-478, 2008.

LIMA, J. A. V.; STACIHW, R.; MILITÃO, J. S. L. T. A problemática ambiental dos poluentes emergentes: possíveis impactos por hormônios sexuais. **Nature and Conservation**. v. 12 n. 1, p. 66-74, 2019.

LOCATELLI, M. A. F.; SODRÉ, F. F.; JARDIM, W. F. Determination of antibiotics in Brazilian surface waters using liquid chromatography-electrospray tandem mass spectrometry. **Archives of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 60, p. 385–393, 2011.

MAZHANDU, Z.; MASHIFANA T. Active pharmaceutical contaminants in drinking water: myth or fact? **Daru Journal of Pharmaceutical Sciences**. 2024, v 32, p. 925–945, 2024.

MELO, S. A. S.; TROVÓ, A. G.; BAUTITZ, I. R.; NOGUEIRA, R. F. Degradação de fármacos residuais por processos oxidativos avançados. **Química Nova**, v. 32, n. 1, p. 188197, 2009.

MOKNI, S.; TLILI, M.; JEDIDI, N.; HASSEN, H. Applicability of electrocoagulation process to the treatment of Ofloxacin and Chloramphenicol in aqueous media: Removal mechanism and antibacterial activity. **Journal of Water Process Engineering**, v. 49, p. 103080, 2022.

MONTAGNERA, C. C.; VIDALA, C.; ACAYABA, R. D. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: Cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. **Química Nova**, v. 40, n. 9, p. 1094-1110, 2017.

MOTTA, M. S.; BASSO, S. J. L.; KALINKE, M. A. Mapeamento sistemático das pesquisas realizadas nos programas de mestrado profissional que versam sobre a aprendizagem matemática na educação infantil. **ACTIO**, Curitiba, v. 4, n. 3, p. 204-225, 2019

MOSTAFALOO, R.; ASADI-GHALHARI, M. Modeling and Optimization of the Electrochemical Process for Cefixime Removal from Water. **Analytical & Bioanalytical Electrochemistry**. v. 12, n. 1, P. 36-47, 2020.

MOROSINI, M.; NASCIMENTO, L. M.; NEZ, E. Estado de conhecimento: a Metodologia na prática. **Humanidade & Inovação**, v. 8, n. 55, p. 69-81, 2021.

NASCIMENTO, R. F.; RIBEIRO, J. P.; ABDALA NETO, E. F.; OLIVEIRA, A. G.; ROMERO, F. B. **Processos eletrolíticos**: Fundamentos e aplicações em matrizes ambientais, Fortaleza: Imprensa Universitária, 2021.

PAN, G.; SUN, X.; SUN, Z. Fabrication of multi-walled carbon nanotubes and carbon black co-modified graphite felt cathode for amoxicillin removal by electrochemical advanced oxidation processes under mild pH condition. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 27, p. 8231-8247, 2020.

PATEL, S.; CASBEER, D. Enhanced Electroflotation & Its Application in Offshore & Marine Sewage Treatment System. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/347534161_Enhanced_Electroflotation_Its_Application_in_Offshore_Marine_Sewage_Treatment_System. Acesso em 14 dez 2024.

POTRICH, M. C. **Aplicação de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouro de aves utilizando eletrodos de ferro e alumínio para remoção de nutrientes**. Dissertação de Mestrado. o Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

PRADO, A., ENZWEILER, H.; PAULINO, A. T. Processos de Adsorção de Poluentes Emergentes em Materiais Poliméricos: Uma Revisão comportamento e impacto ambiental de antibióticos usados na produção animal brasileira. In: **Seminário de iniciação científica da Univ.do Estado de Santa Catarina**, 31º SIC UDESC, 2021. Disponível em:

https://www.udesc.br/arquivos/udesc/id_cpmenu/14605/37_16341507346873_14605.pdf. Acesso em: 15 out. 2024.

REGITANO, J. B.; LEAL, R. M. P.; Comportamento e impacto ambiental de antibióticos usados na produção animal brasileira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n. 3, p. 601-616, 2010.

REIS FILHO, R. W.; BARREIRO, J. C.; VIEIRA, E. M.; CASS, Q. B. Fármacos, ETes e corpos hídricos. **Revista Ambiente e Água**. v. 2, n. 3, p.54-61, 2007.

SHARAN, S.; KHARE, P.; SHANKAR, R.; MISHRA, N. K.; TYAGI, A. Bimetal-oxide (Fe/Co) modified bagasse-waste carbon coated on lead oxide-battery electrode for metronidazole removal. **Journal of Environmental Management**, v. 347, p. 119104, 2023.

SHI, H.; WANG, Q.; NI, J.; XU, Y.; SONG, N.; GAO, M. Highly efficient removal of amoxicillin from water by three-dimensional electrode system within granular activated carbon as particle electrode. **Journal of Water Process Engineering**, v. 38, p. 101656, 2020.

SILVA, L. T. V.; ROMERO, F. B.; ABDALA NETO, E. F.; RIBEIRO, J. P.; AMAZONAS, Á. A; OLIVEIRA, A. G.; NASCIMENTO, R. F. Estudo do pós-tratamento de efluente têxtil após eletrocoagulação utilizando eletro oxidação e ozonização. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, XXII., 23 a 26 set. 2018; Encontro Brasileiro Sobre o Ensino de Engenharia Química, XVII., 27 a 28 set. 2018, São Paulo, Brasil. **Anais [...]** São Paulo, 2018.

STUMPF, M. R.; TERNES, T. A.; WILKEN, R. D.; RODRIGUES, S. V.; BAUMANN, W. Polar drug residues in sewage and natural waters in the state of Rio de Janeiro, Brazil. **The Science of the Total Environment**, v. 225, n. 1-2, p. 135-141, 1999.

THOMAS, K. V.; SILVA, F. M. A.; LANGFORD, K.H.; SOUZA, A. D. L. NIZZETO, L; WAICHMAN, A. V. Screening for selected human pharmaceuticals and cocaine in the urban streams of Manaus, Amazonas, Brazil. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 50, n. 2, p. 302-308, 2014.

VALENTE, G. F. S. **Avaliação de eletrocoagulação no tratamento de efluente líquido da indústria de laticínios**. Tese. Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal de Viçosa, 2012.

WACHTER, N.; AQUINO, J. M.; DENADAI, M.; BARREIRO, J. C.; SILVA, A. J.; CASS, Q. B.; ROCHA-FILHO, R. C.; BOCCHI, N. Optimization of the electrochemical degradation process of the antibiotic ciprofloxacin using a double-sided β -PbO₂ anode in a flow reactor: kinetics, identification of oxidation intermediates and toxicity

evaluation. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 26, p. 4438-4449, 2019.

ZHANG, H.; BIAN, J.; YANG, C.; HU, Z.; LIU, F.; ZHANG, C.; Removal of tetracycline from livestock wastewater by positive single pulse current electrocoagulation: Mechanism, toxicity assessment and cost evaluation. **Science of The Total Environment**, v. 810, p. 151955, 2022.

ZHANG, Y.; JIANG, W.; DONG, H.; HU, X.; FANG, B.; GAO, G. ZHAO, R. Study on the Electrochemical Removal Mechanism of Oxytetracycline by a Ti/IrO₂-Ta₂O₅ Plate. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. v. 18, n. 4, p. 1708, 2021.