

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

CAMPUS AVARÉ

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE BIODISSISTEMAS

TAÍS RODRIGUES LOPES

**PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS NO TRATAMENTO DE
EFLUENTES CONTENDO FORMOL E FENOL**

**AVARÉ
2023**

TAÍS RODRIGUES LOPES

**PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS NO TRATAMENTO DE
EFLUENTES CONTENDO FORMOL E FENOL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Biosistemas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - *Campus Avaré*, como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Biosistemas.

Orientador(a): Prof^a. Dr^a. Marcela Pavan Bagagli

AVARÉ
2023

Catálogo na fonte
Instituto Federal de São Paulo – Campus Avaré

Lopes, Taís Rodrigues

Processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes contendo formol e fenol/ Taís Rodrigues Lopes - Avaré, 2023. 50 p.

Orientadora: Prof.^a Dra. Marcela Pavan Bagagli

Monografia (Graduação - Bacharelado em Engenharia de Biosistemas) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - Campus Avaré, Avaré, 2023.

1. Processos Oxidativos Avançados 2. Formol 3. Fenol I. Bagagli, Marcela Pavan. II. Título.

ATA N.º 18/2023 - CBEB-AVR/DAE-AVR/DRG-AVR/IFSP

Ata de Defesa de Trabalho de Conclusão de Curso - Graduação

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES CONTENDO FORMOL E FENOL** apresentado pela aluna **Taís Rodrigues Lopes (AV3005682)** do Curso **SUPERIOR EM ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS**, (Câmpus Campus Avaré). Os trabalhos foram iniciados às 14:00 pela Professora presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

Membros	IES	Presença (Sim/Não)	Aprovação/Conceito
Marcela Pavan Bagagli (Presidente/Orientador)	IFSP- Câmpus Avaré	Sim	Aprovado
Rafael Aparecido Ferrerira (Examinador 1)	IFSP - Câmpus Avaré	Sim	Aprovado
Adria de Sousa Bentes (Examinador 2)	IFSP - Câmpus Capivari	Sim	Aprovado

Observações:

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo da monografia, passou à arguição do candidato. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pelo aluno, tendo sido atribuído o seguinte resultado:

Aprovado(a)

Reprovado(a)

Nota Final: 8,8

O segundo examinador é avaliador externo:

Sim Não

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Campus Avaré,

25 de novembro de 2023

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcela Pavan Bagagli**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 25/11/2023 16:27:03.
- **Adria de Sousa Bentes**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 26/11/2023 06:55:12.
- **Rafael Aparecido Ferreira**, COORDENADOR(A) - FUC1 - CBEB-AVR, em 26/11/2023 11:21:57.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 23/11/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifsp.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 652049
Código de Autenticação: 150f3ed9b3



Dedico essa monografia à minha família,
por todo apoio e esforço para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pelo dom da vida e por me dar forças para chegar até aqui, superando as dificuldades encontradas pelo caminho.

Aos meus familiares, pelo apoio e incentivo, principalmente aos meus pais, Jueliza e Carlos, por não me deixarem desistir.

Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado, especialmente a Aline Ferreira da Cruz, por me ouvir e me entender, fazendo meus dias mais leves.

Aos meus colegas, por compartilharem os seus conhecimentos e experiências, contribuindo com o meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus professores, pela paciência no ensinar e incentivo durante toda a graduação, em especial, a minha orientadora Marcela Pavan Bagagli, por todo o conhecimento compartilhado durante as matérias ministradas e neste período de conclusão da graduação.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo pela estrutura e apoio fornecidos durante o tempo em que passei nessa instituição.

O desenvolvimento sustentável ocorre a partir de uma lógica que satisfaça as necessidades do presente, sem comprometer a capacidade das necessidades das gerações futuras, pois o saber ambiental emerge de uma reflexão sobre a construção da própria vida humana na Terra.

(ROOS; BECKER, 2012, p.857)

RESUMO

Devido à alta concentração de poluentes orgânicos presentes em efluentes gerados por diversos processos industriais, os impactos causados pelos mesmos ao meio ambiente e a ineficácia de grande parte dos tratamentos convencionais de água e esgoto em degradar esses poluentes, cresce a busca por maneiras eficazes de tratar os efluentes com tais substâncias. Um tratamento que vem ganhando destaque na degradação de poluentes orgânicos, devido ao alto poder de oxidação, são os Processos Oxidativos Avançados (POA) que utilizam de várias técnicas para mineralizar uma gama de compostos. Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo o estudo e análise dos Processos Oxidativos Avançados existentes e suas aplicações específicas no tratamento de efluentes de diversas origens que contém especificamente formol e fenol. A revisão bibliográfica integrativa abordou as metodologias existentes através de pesquisas científicas, bancos de dados da Web e trabalhos acadêmicos datados de 1997 a 2023. Diante disso, constatou-se, através da pesquisa bibliográfica, que os tratamentos realizados com os Processos Oxidativos Avançados possuem uma alta eficácia na degradação dos compostos estudados e, assim, podem ser disseminados entre as indústrias e também laboratórios.

Palavras-chave: Processos Oxidativos Avançados; Formol; Fenol.

ABSTRACT

Due to the high concentration of organic pollutants present in effluents generated by various industrial processes, the environmental impacts caused by them, and the inefficiency of a large portion of conventional water and sewage treatments in degrading these pollutants, there is a growing search for effective ways to treat effluents containing such substances. A treatment that has been gaining prominence in the degradation of organic pollutants, due to its high oxidation power, is Advanced Oxidative Processes (AOPs), which use various techniques to mineralize a range of compounds. Thus, the present work aims to study and analyze existing Advanced Oxidative Processes and their specific applications in the treatment of effluents from various sources containing specifically formaldehyde and phenol. The integrative literature review addressed existing methodologies through scientific research, web databases, and academic papers dated from 1997 to 2023. Consequently, through the literature review, it was found that treatments with Advanced Oxidative Processes are highly effective in degrading the studied compounds and can therefore be disseminated among industries and laboratories.

Keywords: Advanced Oxidative Processes; Formaldehyde; Phenol.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Fluxograma dos processos de tratamento de efluente.....	16
Figura 2. Esquema representativo simplificado dos processos oxidativos avançados para a mineralização da matéria orgânica.....	18
Figura 3. Fórmula estrutural do formaldeído.....	20
Figura 4. Fórmula estrutural do fenol.....	21
Figura 5. Esquema do processo fotocatalítico atuando no fotocatalisador semicondutor.....	25
Figura 6. Sistema eletroquímico com (a) agitação magnética e (b) recirculação: (1) fonte de alimentação, (2) elétrodos, (3) suporte para os eletrodos, (4) agitador magnético, (5) placa de agitação e (6) célula eletroquímica, (7) reservatório, (8) bomba peristáltica e (9) célula eletroquímica de fluxo.....	27
Figura 7. Representação esquemática do sistema fotocatalítico.....	29
Figura 8. Esquema de montagem do reator foto-Fenton utilizado no estudo de degradação de fenol em presença de peróxido de hidrogênio.....	31
Figura 9. Sistema dos processos simultâneos de ozonização e adsorção.....	32
Figura 10. Resultado do planejamento fatorial 2^2 para a otimização do sistema foto-Fenton.....	33
Figura 11. Comparação do efluente bruto com o efluente tratado por foto-Fenton (Fe^{2+} 812 mg L ⁻¹ / H ₂ O ₂ 5646 mg L ⁻¹), com radiação natural, em tempo de reação de 100 min.....	34
Figura 12. Fluxograma das etapas do resíduo no PGRL.....	35
Figura 13. Fotorreator desenvolvido na Embrapa Instrumentação para tratamento de resíduos.....	36
Figura 14. Modelos de fotorreatores utilizados: A) Fotorreator de baixa potência, com lâmpada de 25W; B) Fotorreator de alta potência, com lâmpada de 95W....	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Volume de resíduos de laboratório tratados (L) até 2013.....	38
Tabela 2. Resumo dos Processos Oxidativos Avançados (POAs) aplicados no tratamento de efluentes contendo formol.....	39
Tabela 3. Resumo dos Processos Oxidativos Avançados (POAs) aplicados no tratamento de efluentes contendo fenol.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BiPO ₄	Fosfato de bismuto
CB	Banda de condução
CH ₂ O	Formaldeído
CO ₂	Dióxido de carbono
COD	Concentração de oxigênio dissolvido
COT	Carbono orgânico total
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DOC	Carbono orgânico dissolvido
DQO	Demanda química de oxigênio
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
EF	Eletro-Fenton
EO	Espécie orgânica genérica
EO●	Radical orgânico livre
e _{bc} ⁻	Par elétron
Fe ²⁺	Íon ferroso
Fe ³⁺	Íon férrico
Fotocatálise/US	Processo combinado de fotocatalise e ultrassom
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrogênio
H ₂ O ₂ /US	Processo combinado de peróxido de hidrogênio e ultrassom
H ₂ O ₂ /UV	Processo combinado de peróxido de hidrogênio e ultravioleta
H ₂ O ₂ /Fe ²⁺ /UV	Processo foto-Fenton
●HO	Radical livre hidroxila
h _{bv} ⁺	Lacuna
hu	Energia de radiação
IB	Instituto de Biologia
K ₂ CrO ₄	Cromato de potássio
KMnO ₄	Permanganato de potássio
L	Litro
LAPAD	Laboratório de Biologia e Cultivo de Peixes de Água Doce
LCM	Laboratório de Camarões Marinhos
mg	Miligrama
min	Minutos
MgO	Óxido de magnésio
nm	Nanômetro

NTs	Nanotubos
OA	Oxidação Anódica
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio
O ₃ /US	Processo combinado de ozônio e ultrassom
O ₃ /UV	Processo combinado de ozônio e irradiação UV
PFE	Processo Fotoeletro-Fenton
pH	Potencial hidrogeniônico
POAs	Processos Oxidativos Avançados
POAEs	Processos Oxidativos Avançados Eletroquímicos
TiO ₂	Dióxido de titânio
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
US	Ultrassom
UV	Ultravioleta
VB	Banda de valência

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivos	19
1.2 Justificativa	19
1.3 Metodologia	19
2. DESENVOLVIMENTO	20
2.1 Formol e Fenol	20
2.2 Processos Oxidativos Avançados	22
2.3 POA na degradação de Formol	28
2.4 POA na degradação de Fenol	30
2.5 Resumo Visual dos apontamentos da literatura	38
3. CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

A geração de resíduos e efluentes pelas indústrias, dos mais diversos setores, contendo compostos tóxicos ao meio ambiente e recalcitrantes, ou seja, de difícil degradação biológica, é uma realidade mundial. Esta problemática atinge também instituições de pesquisa e ensino, mesmo que em menor quantidade (Bresolin *et al.*, 2014; Lopes, 2018).

Formaldeído e fenol são dois compostos que podem estar presentes em efluentes da indústria de materiais de limpeza, embalagens, adesivos, fertilizantes e materiais de construção, entre outras (INCA, 2022; CETESB, 2012). O formaldeído, conhecido popularmente como formol, é um gás à temperatura ambiente, incolor, estável, inflamável e de odor sufocante. O fenol é um sólido branco cristalino em seu estado puro. Geralmente é vendido e utilizado na forma líquida e possui odor forte, levemente doce e irritante. Essas moléculas podem estar presentes em efluentes industriais despejados em corpos hídricos desde que os critérios de pH e demanda de oxigênio estejam adequados (CETESB, 2012).

Para o descarte correto de efluentes industriais em corpos d'água receptores, deve-se seguir os parâmetros definidos pelas resoluções nº 357 de 2005 e nº 430 de 2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que indicam que o pH deve ser entre 5 e 9, possuir temperatura inferior a 40°C, com até 1 mL/L de materiais sedimentáveis, ausência de materiais flutuantes e remoção mínima de 60% de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) em 5 dias a 20°C, sendo que este limite só poderá ser reduzido em caso de existência de estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas de enquadramento do corpo receptor.

A Química Verde é uma terminologia adotada por indústrias e laboratórios visando reduzir resíduos e efluentes, especialmente os tóxicos, reduzir a utilização de recursos, incentivar o uso de energia e materiais de fontes

renováveis além de reduzir o consumo de energia, considerando os princípios da sustentabilidade (Pagno *et al.*, 2017).

Nos laboratórios de ensino e pesquisa das universidades, e outras instituições que realizam análises químicas, há geração de efluentes e resíduos em quantidade considerável. O mesmo ocorre para a área da saúde e estas instituições podem se orientar para fazer o gerenciamento de resíduos na Resolução 306 da ANVISA de 2004, que aborda o gerenciamento de resíduos para a área da saúde. Além disso, a redução dos volumes de resíduos gerados nas instituições de ensino pode se dar através da análise dos roteiros de aulas propostos pelos docentes, buscando práticas menos poluentes e que prezam pela Química Verde (Pagno *et al.*, 2017; Bresolin *et al.*, 2014; Lopes, 2018).

Um sistema de tratamento de efluentes é constituído por uma série de etapas e processos, os quais são empregados para a remoção de substâncias indesejáveis da água ou para sua transformação em outra forma que seja aceitável pela legislação ambiental. Os principais processos de tratamento envolvem processos físicos, químicos e biológicos, conforme ilustrado na Figura 1 (Marcondes, 2012).

Figura 1 - Fluxograma dos processos de tratamento de efluente



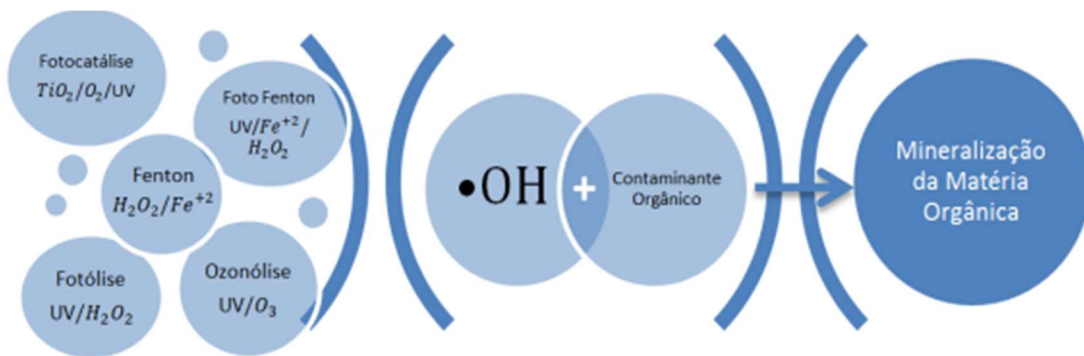
Fonte: Marcondes, 2012

Dentre os processos para promover a adequação dos efluentes industriais, os tratamentos biológicos são atualmente os mais utilizados, devido aos baixos custos de implantação e operação e a possibilidade de tratar grandes volumes. Porém, este tipo de tratamento possui limitações que podem restringir sua eficiência no tratamento de determinadas classes de efluentes com elevada toxicidade, como os organoclorados e fenóis (Fioreze *et al.*, 2014).

Os processos físicos e químicos apresentam uma enorme aplicabilidade em sistemas de depuração ambiental. Porém, métodos como a precipitação e a incineração, apesar de amplamente utilizados, são bastante discutíveis, devido ao fato de o primeiro causar uma simples mudança de fase dos compostos sem eliminá-los, e do segundo possuir alto custo e possibilidade de formação de compostos mais tóxicos que o próprio efluente. Dentre as novas tecnologias, se destacam os Processos Oxidativos Avançados (POAs), os quais se baseiam na utilização de espécies altamente oxidantes para promover uma degradação mais efetiva do poluente a ser tratado (Fioreze *et al.*, 2014).

Os POAs podem ser utilizados em conjunto com tratamentos biológicos, a fim de aumentar a biodegradabilidade de compostos recalcitrantes, diminuindo assim o tempo requerido para o tratamento via processos biológicos tradicionais (Brito; Silva, 2012; Fioreze *et al.*, 2014). A Figura 2 ilustra os principais POAs utilizados no tratamento de efluentes industriais e, de forma sucinta, seu funcionamento.

Figura 2 - Esquema representativo simplificado dos processos oxidativos avançados para a mineralização da matéria orgânica



Fonte: Adário, 2014

POAs podem alcançar altos níveis de degradação dos poluentes. Rosenbrock (2016) obteve valores de 60 a 90 % de degradação do formaldeído presente em suas amostras, via processo Fenton. Já para o processo de degradação do fenol, Zaidan *et al.* (2014), utilizando um reator fotoquímico anular de bancada de fluxo ascendente, observou redução de 96% de carbono orgânico total (COT).

Estes processos têm como desvantagem a limitação econômica que está relacionada ao alto custo da fonte de radiação UV, implicando em consumo de energia elétrica e custo de manutenção, e ao alto custo do agente oxidante. Tal inconveniente pode ser solucionado mediante o uso de energia solar, catalisadores de baixo custo e combinação com outros processos de tratamento, desde que não haja interferência no desempenho do processo (Araújo *et al.*, 2014).

Dessa forma, esta revisão bibliográfica almejou avaliar as aplicações dos processos oxidativos avançados utilizados na degradação de efluentes contendo formaldeído e fenol.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é realizar um levantamento bibliográfico dos processos oxidativos avançados (POA) utilizados no tratamento de efluentes que contenham formol e fenol. Para tal, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Identificar e descrever as formas de tratamento reportadas na literatura científica e técnica para efluentes;
- Avaliar, através da literatura, aplicações específicas de processos oxidativos avançados na degradação destes efluentes.

1.2 Justificativas

Devido à alta toxicidade e recalcitrância dos efluentes contendo formaldeído e fenol e os impactos causados pelos mesmos, é de grande relevância a compilação e apresentação dos principais processos oxidativos avançados (POA) que podem ser utilizados, de maneira eficaz, no tratamento desses efluentes, possibilitando, assim, diminuir os impactos ambientais futuros.

1.3 Metodologia

Para o presente trabalho utilizou-se o método de revisão bibliográfica integrativa, que aborda metodologias diversas, buscando a integração dos resultados. Buscas rigorosas sobre técnicas de degradação de efluentes contendo formol e fenol através dos processos oxidativos avançados foram realizadas, sendo 64 artigos avaliados e filtrados e 43 deles utilizados para compor este trabalho. Banco de dados da web como Google Acadêmico, Scielo, ACS Publications, entre outros foram utilizados.

Para compor a presente revisão bibliográfica, documentos publicados de 1997 até 2023 foram avaliados. Para as pesquisas de documentos publicados, palavras chaves como degradação, efluentes, processos oxidativos avançados, formol, fenol foram utilizadas para a pesquisa sobre os processos oxidativos avançados e sua aplicação no tratamento de efluentes específicos.

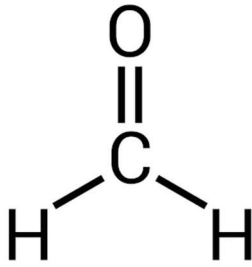
2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Formol e Fenol

O formaldeído é um composto orgânico que possui propriedades estabilizantes, bactericidas e plastificantes, comumente utilizado na produção de resinas ureia-formol, fenol-formol e melamínica, como matéria-prima para diversos produtos químicos, como agente esterilizante, preservante de produtos cosméticos e de limpeza, na embalsamação de peças anatômicas, preservativo de cadáveres e órgãos em laboratórios de anatomia e laboratórios de análises clínicas (Farah, 2007). O formaldeído e diversos derivados químicos dificilmente biodegradáveis são encontrados em resíduos de diferentes processos químicos e frequentemente são acompanhados de metanol.

O formaldeído, popularmente conhecido como formol, é um gás incolor em temperatura ambiente, com forte odor característico e altamente inflamável (CETESB, 2012). A principal rota de produção comercial do formol é a oxidação catalítica do metanol (álcool) na presença de ar e catalisadores de óxidos metálicos ou de prata. O principal uso do composto é na produção de resinas com ureia, fenol e melamina e de resinas de poliacetal. Também é empregado na indústria têxtil, couro, borracha e cimento, como agente desinfetante e conservante, na síntese de outros compostos químicos, entre outros usos. É comercializado normalmente na forma de soluções aquosas em concentrações entre 30-50 % (por peso) (CETESB, 2012). Sua fórmula estrutural é apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Fórmula estrutural do formaldeído

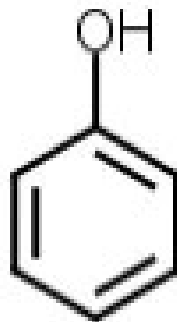


As principais fontes de formol são os processos de combustão, tais como: emissões de veículos motores, usinas/centrais elétricas, incineradores, refinarias, fogões à lenha e a gás, aquecedores de querosene, fumaças de incêndios e de cigarro (NIH, 2018; IARC, 2012).

O formaldeído é geralmente encontrado em águas residuárias em concentrações de até 10.000 mg/L, porém já a 5 mg/L apresenta toxicidade a diversos tipos de organismos (Gonzalez-Gil *et al.*, 2002).

O fenol é um sólido branco cristalino em seu estado puro. Geralmente é vendido e utilizado na forma líquida e possui odor forte, levemente doce e irritante. Apresenta diversas aplicações, como precursor ou reagente na produção de resinas, plásticos, medicamentos, herbicidas e desinfetantes. (CETESB, 2012). Sua fórmula estrutural é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Fórmula estrutural do fenol



As principais fontes de exposição são a produção e a utilização de fenol e seus produtos, a queima de madeira, a fumaça de cigarro, a degradação do benzeno sob influência da luz e os dejetos animais. O fenol apresenta meia-vida curta no ar, menor do que um dia, e reage fotoquimicamente formando radicais hidroxilas. No solo, geralmente permanece apenas por 2 a 5 dias e sua biodegradação ocorre tanto em condições anaeróbias como aeróbias. Na água a sua degradação também é rápida, contudo se houver altas concentrações, a substância pode permanecer por mais de uma semana (CETESB, 2012).

A Resolução CONAMA nº430/2011 cita a quantidade máxima permitida para descarte de fenóis totais de 0,5 mg/L. Os compostos fenólicos também são tóxicos ao meio ambiente aquático, podendo provocar a morte de peixes, mesmo em concentrações na faixa de 1 mg/L (Britto; Rangel, 2008).

Desta forma, é observada uma grande necessidade de desenvolver procedimentos que sejam eficientes no tratamento de efluentes contendo formaldeído e fenólicos. Dentre as novas tecnologias, se destacam os Processos Oxidativos Avançados (POAs), os quais se baseiam na utilização de espécies altamente oxidantes para promover a degradação intensa do poluente a ser tratado (Brito e Silva, 2012).

2.2. Processos Oxidativos Avançados

Processos químicos de tratamento de efluentes são aqueles onde a utilização de produtos químicos é necessária para aumentar a eficiência de remoção de um elemento ou substância, modificando seu estado ou estrutura, ou simplesmente alterando suas características químicas, sendo que esses são utilizados em conjunto com os processos físicos e algumas vezes a processos biológicos. Entre os processos físico-químicos estão os processos oxidativos avançados (POAs) (Marcondes, 2012).

Todos os POAs apresentam em comum a participação do radical hidroxila ($\text{HO}\bullet$) no mecanismo de reação, sendo este altamente reativo, não seletivo e

capaz de oxidar e decompor várias espécies tóxicas e/ou recalcitrantes, o que configura um importante ponto no tratamento de resíduos (Pignatello *et al.*, 2006).

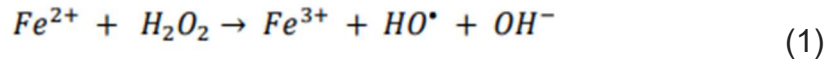
Na degradação de uma espécie orgânica genérica (EO), o radical hidroxila ($\text{HO}\bullet$) oxida a espécie orgânica por abstração de hidrogênio, originando o radical orgânico ($\text{EO}\bullet$) que, em seguida, pela adição de oxigênio, forma o radical peróxido orgânico ($\text{EOO}\bullet$). Dessa maneira, as reações em cadeia são iniciadas por estes intermediários, gerando radicais secundários, intermediários mais oxidados. Após sucessivas etapas, na presença de oxigênio (O_2), são produzidos água, sais orgânicos e dióxido de carbono (CO_2) (Pignatello *et al.*, 2006).

A produção do radical hidroxila pode ocorrer por aplicação da radiação ultravioleta (UV) ou utilização de agentes oxidantes fortes como ozônio (O_3) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), bem como por diferentes possibilidades de combinações provenientes da radiação e desses agentes oxidantes. Além disso, esse radical pode ser gerado por ultrassom (US) e/ou oxidação eletroquímica (Azbar *et al.*, 2004).

De acordo com Pignatello *et al.* (2006), os principais POAs são divididos em processos Químicos (processo Fenton), Fotoquímicos (incluindo $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, O_3/UV , $\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, Foto-Fenton, Fotocatálise heterogênea), Sonoquímicos (incluindo US O_3/US , $\text{H}_2\text{O}_2/\text{US}$, Fotocatálise/US, Sono-Fenton), e Eletroquímicos (incluindo Oxidação Anódica, Eletro-Fenton, Fotoeletro-Fenton, Sonoeletroquímico, Sonoeletro-Fenton).

Dentre os POAs Químicos, destaca-se o processo Fenton que envolve reações da espécie peróxido de hidrogênio (H_2O_2) dissolvido na presença de íons de ferro a fim de gerar espécies fortemente oxidantes para degradar ou destruir uma variedade de poluentes orgânicos. O processo Fenton utiliza íons ferrosos (Fe^{2+}) ou férricos (Fe^{3+}) como catalisadores, em meio ácido, para

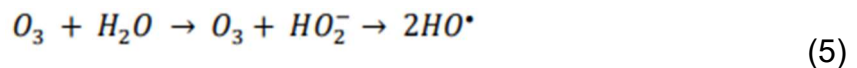
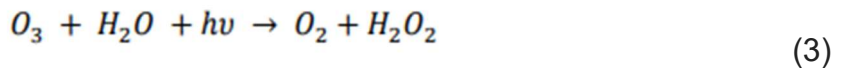
promover a decomposição de H_2O_2 e, assim, gerar radicais hidroxila ($HO\bullet$) (Equação 1) (Brillas *et al.*, 2009).



A fotólise do peróxido de hidrogênio por irradiação UV (H_2O_2/UV) é um processo que pode ocorrer naturalmente, constituindo em uma alternativa para degradar compostos orgânicos tóxicos. O H_2O_2 pode ser fotolisado por irradiação UV em comprimentos de onda de 200 a 300 nm (representado como $h\nu$) ocasionando a quebra da ligação covalente entre os oxigênios da molécula de H_2O_2 gerando radicais hidroxila ($HO\bullet$) (Equação 2) que agem na degradação de espécies orgânicas (Hernandez *et al.*, 2002).



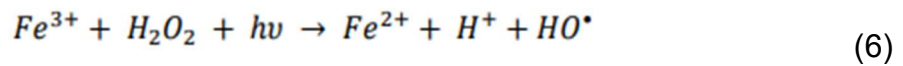
No processo combinado de ozônio e irradiação UV (O_3/UV) os radicais hidroxila ($HO\bullet$) são produzidos direta e indiretamente, aumentando a degradação da matéria orgânica. Em solução aquosa, o O_3 absorve radiações UV entre 200 e 360 nm, gerando radicais hidroxila, conforme equações 3, 4 e 5 (Hernandez *et al.*, 2002).



Segundo Azbar *et al.* (2004), a adição de H_2O_2 ao processo O_3/UV ocasiona um aumento da taxa de geração de radicais hidroxila, podendo acelerar a degradação de poluentes. O processo $O_3/ H_2O_2/UV$, comparado aos processos UV, H_2O_2/UV e O_3/UV , apresenta grau de mineralização, ou seja,

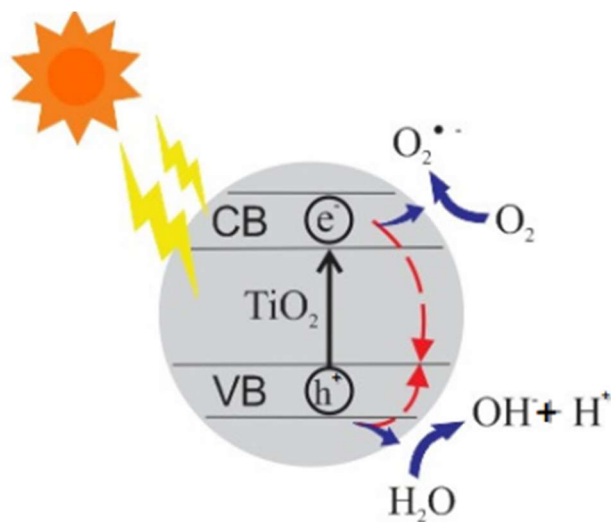
de degradação da matéria orgânica em compostos mais simples, como CO₂ e H₂O, mais elevado (Santin, 2017).

Da mesma maneira, o processo Foto-Fenton (H₂O₂/Fe²⁺ /UV) aumenta a formação de radicais hidroxila (HO•). Trata-se do processo Fenton assistido por radiação UV que induz a redução catalítica em soluções aquosas de H₂O₂ e de Fe³⁺ (íons férricos) a Fe²⁺ (íons ferrosos) (Equação 6). No processo Foto-Fenton também ocorre a decomposição direta de moléculas de H₂O₂ em radicais hidroxila como no processo H₂O₂/UV (Equação 1). Uma alternativa para reduzir os custos econômicos do processo Foto-Fenton é pelo processo Foto-Fenton solar que utiliza todo o espectro eletromagnético (Silva *et al.*, 2007).



Outro tipo de POA Fotoquímico é a fotocatalise heterogênea, uma tecnologia de foto-indução que atua sobre um catalisador sólido semiconductor (superfície e suspensão), geralmente o dióxido de titânio (TiO₂), sob irradiação UV ou luz visível, cujo processo pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Esquema do processo fotocatalítico atuando no fotocatalisador semiconductor



Fonte: Araújo *et al.*, 2016

No catalisador semiconductor existe uma descontinuidade de energia entre a banda de valência (VB – região de energia mais baixa) e a banda de condução (CB – região de energia mais alta). Quando a energia de irradiação ($h\nu$) é igual ou ultrapassa a energia de *band-gap* (diferença de energia entre as bandas VB e CB) os elétrons são promovidos da VB para a CB e deixam lacunas (h_{bv}^+), originando um par elétron/lacuna (e_{bc}^- / h_{bv}^+) que pode recombinar-se diretamente ou migrar para a superfície do semiconductor, induzindo reações de oxidação-redução. As reações de oxidação podem acontecer entre a lacuna da BV e os grupos hidroxila, ou água, formando radicais hidroxila. Enquanto isso, as reações de redução podem ocorrer entre o e_{bc}^- e o oxigênio, desencadeando reações que ocasionam a geração de radicais hidroxila (Angelo *et al.*, 2013).

As técnicas de oxidação sonoquímicas são baseadas na utilização de radiação ultrassônica (US) a fim de criar um ambiente oxidativo (Sathishkumar *et al.*, 2016). Sob radiação ultrassônica os radicais hidroxila são formados na presença de diferentes gases e também em combinação com outros processos (O_3/US , H_2O_2/US e fotocátalise/US) (Adewuyi, 2001).

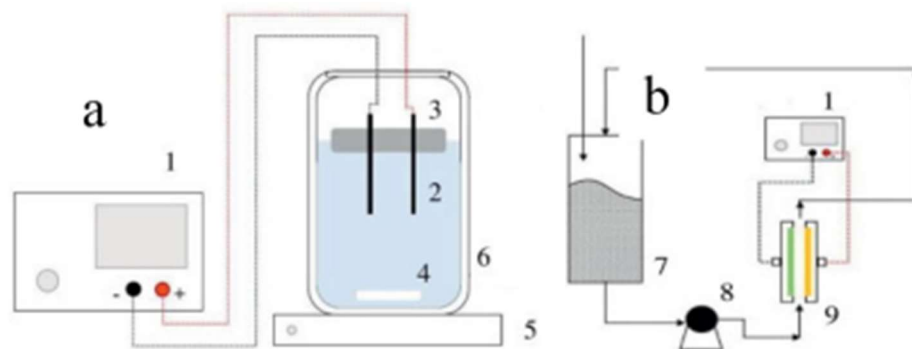
Os processos combinados de ozônio com ultrassom (O_3/US), peróxido de hidrogênio com ultrassom (H_2O_2/US) ou ultrassom com fotocátalise (fotocátalise/US) ocasionam um aumento expressivo da taxa de geração de radicais livres (Chakinala *et al.*, 2009).

Outro tipo de associação de POAs é o processo Sono-Fenton. Trata-se do acoplamento da radiação ultrassônica com o processo Fenton, em que a decomposição de H_2O_2 sob radiação ultrassônica resulta em uma maior concentração de $HO\bullet$, promovendo a aceleração da degradação dos contaminantes (Chakinala *et al.*, 2009).

Os POAs eletroquímicos (POAEs) consistem em técnicas baseadas na transferência de elétrons, sendo uma forma limpa de energia e eficiente na degradação de poluentes orgânicos. Neste processo ocorre a produção *in situ* do radical hidroxila ($HO\bullet$) o qual degrada uma grande variedade de compostos.

No processo eletroquímico a degradação de um poluente pode ocorrer diretamente (processo de Oxidação Anódica) ou indiretamente (processo Eletro-Fenton). Na Oxidação Anódica (OA) a destruição do poluente ocorre pela transferência de elétrons na superfície do eletrodo. Neste método, os radicais hidroxilas são diretamente formados na superfície do ânodo, por oxidação das moléculas de água (Marselli *et al.*, 2003). A Figura 6 apresenta um sistema eletroquímico de oxidação anódica.

Figura 6 - Sistema eletroquímico com (a) agitação magnética e (b) recirculação: (1) fonte de alimentação, (2) eletrodos, (3) suporte para os eletrodos, (4) agitador magnético, (5) placa de agitação e (6) célula eletroquímica, (7) reservatório, (8) bomba peristáltica e (9) célula eletroquímica de fluxo



Fonte: Lima *et al.*, 2021

No processo Eletro-Fenton (EF) a degradação do poluente ocorre por meio da formação de um agente oxidante *in-situ* que pode migrar da superfície do eletrodo e reagir no seio da solução. Neste método de eletro-oxidação indireta, os radicais hidroxila ($\text{HO}\bullet$) são gerados na reação Fenton eletroquimicamente assistida através do reagente de Fenton (mistura de H_2O_2 e íons ferrosos) em meio homogêneo, conforme a Equação 1 (Brillas *et al.*, 2009).

Comumente a eficácia de degradação é maior em um processo indireto pelo fato de evitar problemas, tais como limitações de transferência de massa e

envenenamento da superfície do eletrodo. A eficiência do processo pode ser aumentada por meio da combinação de ambos os processos eletroquímicos e seus acoplamentos com outros métodos de tratamento, tais como fotoquímico (Fotoeletro-Fenton) e Sonoquímico (Sonoeletro-Fenton e Sonoeletroquímico) (Brillas *et al.*, 2009).

O processo Fotoeletro-Fenton (PFE) envolve o tratamento de soluções sob condições de Eletro-Fenton (processo EF) com utilização simultânea de irradiação UV ou luz visível, durante ou após a eletrólise, para acelerar a taxa de mineralização dos poluentes. No processo Sonoeletro-Fenton, as soluções a serem tratadas são submetidas ao processo EF e radiação ultrassônica concomitantemente, aumentando a taxa de transferência de massa na solução (Sires e Brillas, 2012).

Já no processo sonoeletroquímico, a solução a ser tratada é submetida ao processo eletroquímico simultaneamente com radiação ultrassônica, o qual promove aumento no transporte de massa, auxilia na interface eletrodo-solução e apresenta efeitos benéficos quanto à limpeza da superfície eletródica (Compton *et al.*, 1997).

2.3. POA na degradação de Formol

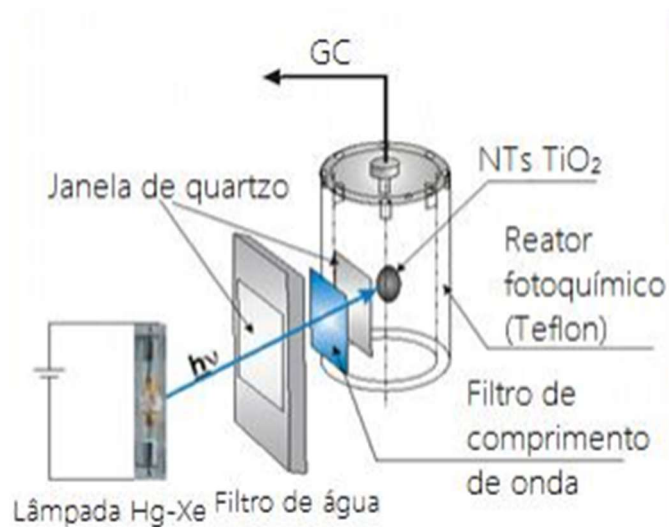
Rosenbrock (2016) utilizou o processo Fenton e o processo de oxidação química com K_2CrO_4 , $KMnO_4$ e H_2O_2 para degradar o formaldeído existente em resíduos gerados nos laboratórios de Biologia e Cultivo de Peixes de Água Doce (LAPAD - UFSC) e de Camarões Marinhos (LCM - UFSC), obtendo resultados de 60 a 90% de degradação para o processo Fenton. Porém, nas amostras com processo de oxidação química, as porcentagens de degradação foram de 6 a 20% apenas.

Farah (2007) realizou ensaios para tratar soluções e efluentes contendo formol conjugando processos físico-químicos com biológicos, obtendo maior sucesso na redução dos teores de formaldeído (CH_2O), concentração de

oxigênio dissolvido (COD), demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), de 91, 48, 46 e 53%, respectivamente, com o processo UV/H₂O₂ no tratamento do efluente proveniente do Laboratório de Anatomia/IB UNICAMP, ao final de 420 min de ensaio.

Araújo (2013) estudou a degradação de soluções contendo formol, com foto geração de H₂, através de um processo fotocatalítico em superfície de um semicondutor, com TiO₂ na forma de nanotubos (NTs), conforme ilustrado na Figura 7, usados para anodização, tendo como parâmetros a serem analisados a concentração de formol, fonte de radiação e o tipo de fotocatalisador. O processo foi aplicado em uma amostra do Laboratório de Patologia Animal da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, porém seus resultados não foram satisfatórios, possivelmente devido à uma contaminação do fotocatalisador, bloqueando sua atividade e interferindo na degradação do formol.

Figura 7 - Representação esquemática do sistema fotocatalítico



Fonte: Araújo, 2013

Kajitvichyanukul *et al.* (2008) utilizaram os processos Fenton e foto-Fenton para degradação de formaldeído em presença de metanol (um aditivo químico em soluções comerciais de formaldeído) sob influência de fatores como pH,

peróxido de hidrogênio e íons ferrosos, em escala laboratorial. A eficiência de remoção de formaldeído e metanol tratados pelo processo foto-Fenton foi maior do que aquela pelo processo Fenton, atingindo taxas de remoção de formaldeído e metanol, após 80 min de reação, de 94% e 78%, respectivamente. Estes dados indicam que os íons ferrosos desempenham um papel crucial no sistema foto-Fenton.

Guimarães *et al.* (2012) estudaram a degradação do formaldeído em solução aquosa utilizando fotólise, peroxidação e diferentes tipos de POA (UV/H₂O₂, Fenton e foto-Fenton), sendo a fotólise o único processo que não reduziu a concentração de formaldeído e apenas os POAs reduziram significativamente o carbono orgânico dissolvido (DOC). Os POAs UV/H₂O₂ foram utilizados para degradar concentrações mais altas de formaldeído (1.200 e 12.000 mg/L), chegando a reduzir o CH₂O em 98% e o DOC em 65%. A peroxidação com a luz ultravioleta (UV/H₂O₂) tornou mais eficaz o tratamento de efluentes em um laboratório de anatomia, o teor de CH₂O foi reduzido em 91%, o DOC em 48%, a DQO em 46% e DBO em 53% em 420 min de teste.

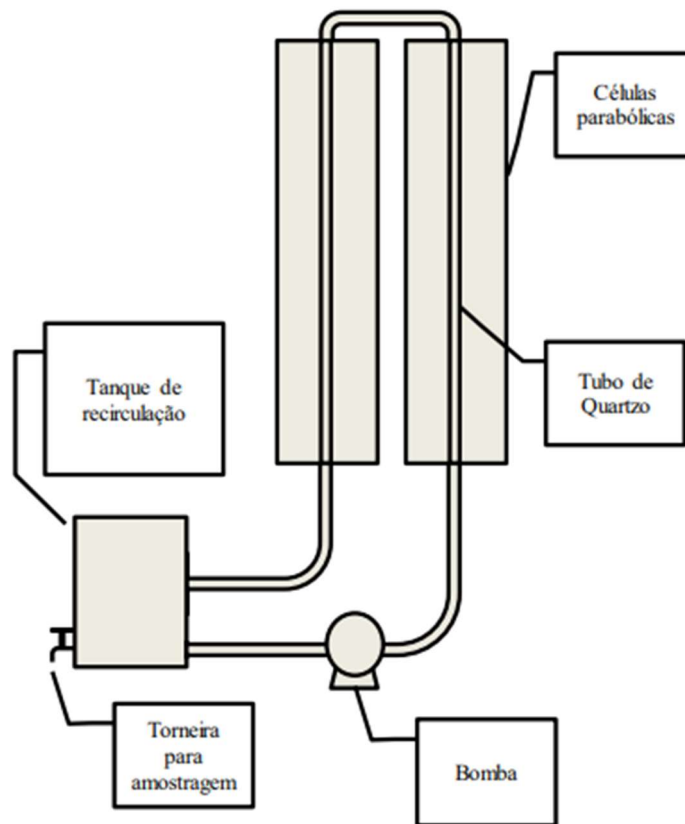
2.4. POA na degradação de Fenol

A degradação do fenol por diferentes POAs, incluindo processos utilizando UV, tem sido reportada na literatura. Sabe-se que a degradação deste contaminante gera produtos intermediários altamente tóxicos. Além disso, se houver H₂O₂ no efluente final, isto também contribui consideravelmente com a toxicidade. Portanto, estudos adicionais sobre os produtos intermediários e sua toxicidade são essenciais para descrever a oxidação do fenol pelo processo UV/H₂O₂ (Primo *et al.*, 2007).

As análises de Zaidan *et al.* (2014) avaliaram a degradação e mineralização do fenol via BiPO₄/H₂O₂/UV, utilizando o reator fotoquímico anular de bancada de fluxo ascendente, obtendo resultados satisfatórios, com até 96% do carbono orgânico total (COT) mineralizado, estando dentro do que a resolução nº 437/2011 do CONAMA pede.

Lopes Neto (2016) utilizou um modelo de degradação do fenol baseado no processo foto-Fenton, com o auxílio de um reator fotoquímico parabólico em batelada para analisar os efeitos das concentrações de fenol, H_2O_2 e Fe^{2+} na porção de COT degradada, retirando amostras em tempos diferentes e analisando-as com um medidor de COT. Seus resultados mostraram um efeito negativo sobre a concentração de fenol e positivo nas demais concentrações. Também foi constatado que a variável concentração de H_2O_2 foi a mais influente sobre a fração de COT degradada. O tratamento dos dados num software de análise estatística (*Statística*) gerou um modelo empírico com coeficiente de determinação de 0,82 e mostrou que a concentração de peróxido de hidrogênio é a variável mais influente na fração de COT degradada. O modelo obtido não gerou resultados com erros aceitáveis, podendo prever resultados maiores do que 1, o que inviabiliza sua utilização como ferramenta adequada de predição. O esquema do reator fotoquímico está apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Esquema de montagem do reator foto-Fenton utilizado no estudo de degradação de fenol em presença de peróxido de hidrogênio

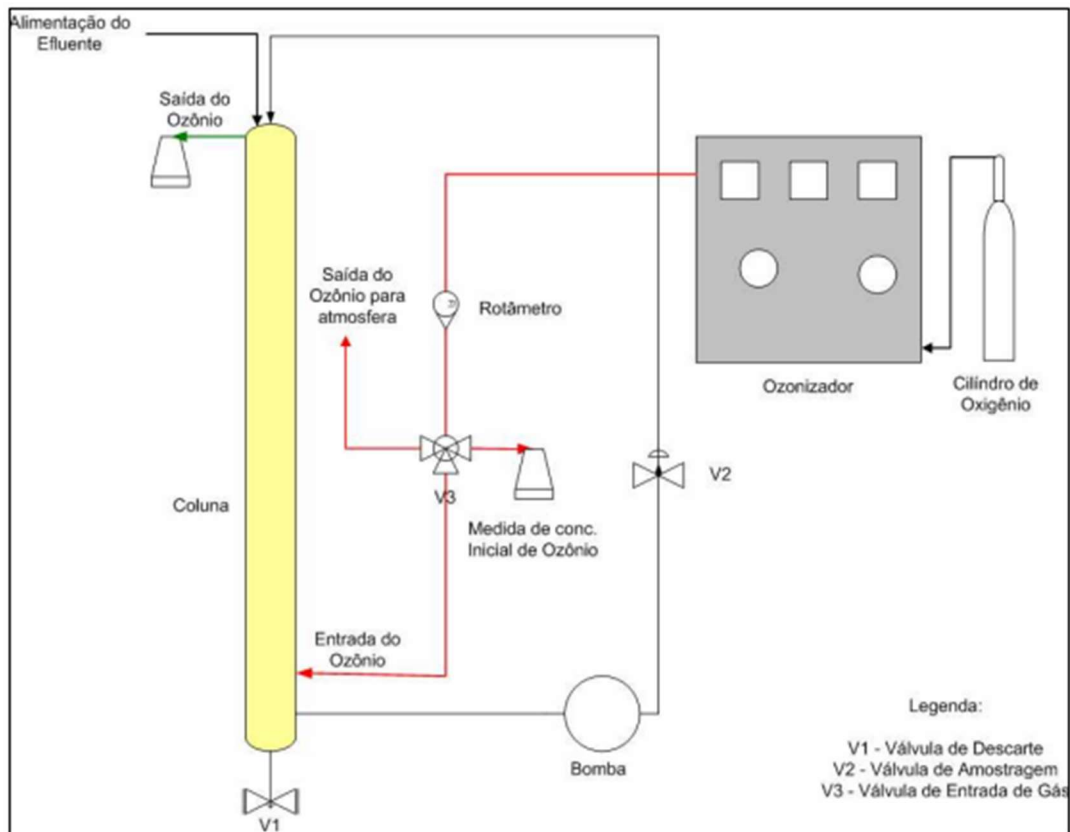


Fonte: Lopes Neto, 2016

Souza (2009) analisou a eficiência de remoção de compostos fenólicos presentes em efluentes petroquímicos sintéticos, utilizando quatro tratamentos diferentes, sendo os processos de ozonização e adsorção com carvão ativado simultâneos, no mesmo reator, o mais eficiente. No processo de ozonização, a degradação de fenol foi mais rápida em meio alcalino (pH 10), onde em 15 min de tratamento 99,5% do fenol foi consumido e a remoção de DQO foi de 87,8% em 30 min. Foram necessárias 17h de tratamento para chegar ao limite de concentração de fenol para descarte em corpos d'água (0,5 mg/L) de acordo com a resolução 397/08 do CONAMA. Nesse experimento, foi possível tratar um volume maior de efluente (17L) quando comparado ao processo de adsorção, no

qual foi possível tratar apenas 5L, considerando a mesma massa de carvão (133 g). O esquema dos processos simultâneos está apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Sistema dos processos simultâneos de ozonização e adsorção

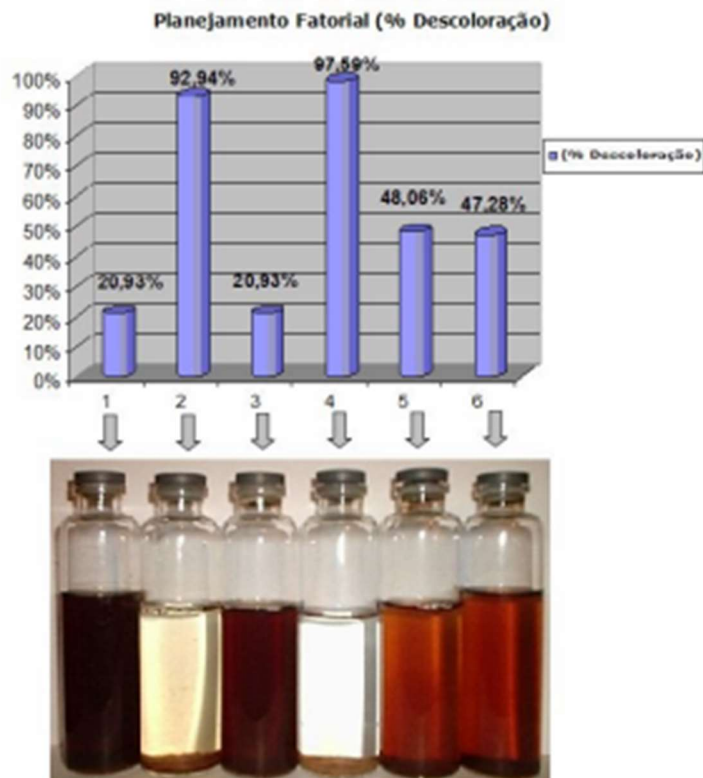


Fonte: Souza, 2009

Borba *et al.* (2008) aplicaram o processo foto-Fenton no tratamento de efluente de preservante de madeira composto, principalmente, por pentaclorofenol e tribromofenol, utilizando um delineamento fatorial com 2 fatores para otimizar o processo. Os resultados apontaram 96% de descoloração, redução de 96 % na DBO, 88 % na demanda química de oxigênio (DQO) e 91 % dos sólidos totais voláteis, atendendo às exigências da legislação nº 357/05 do CONAMA. Na Figura 10, observa-se que os experimentos 2 (812 mg/L⁻¹ de Fe²⁺ e 3328 mg/L⁻¹ de H₂O₂) e 4 (812 mg/L⁻¹ de Fe²⁺ e 5646 mg/L⁻¹ de H₂O₂) apresentaram descolorações semelhantes, sendo de 92,94% e 97,59%, respectivamente. No experimento 4 houve uma maior degradação dos

contaminantes e menor geração de lodo, devido à maior concentração de peróxido de hidrogênio utilizada.

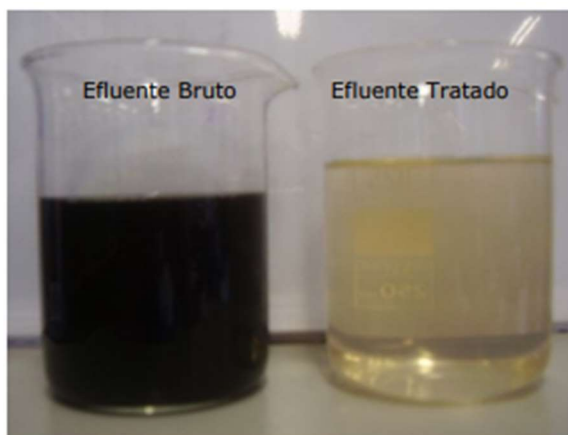
Figura 10 - Resultado do planejamento fatorial 2^2 para a otimização do sistema foto-Fenton



Fonte: Borba *et al.*, 2008

Na terceira etapa, para avaliar a significância das variáveis e indicar condições ótimas para obtenção dos melhores resultados, realizou-se o planejamento fatorial. A Figura 11 apresenta a comparação entre o efluente bruto e o tratamento de 1.400 mL de efluente, com uma concentração de 5.646 mg/L de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e 812 mg/L de íons ferrosos (Fe^{2+}), por um período de 100 min. Com 5 min de tratamento, verifica-se uma descoloração superior a 96% (Borba *et al.*, 2008).

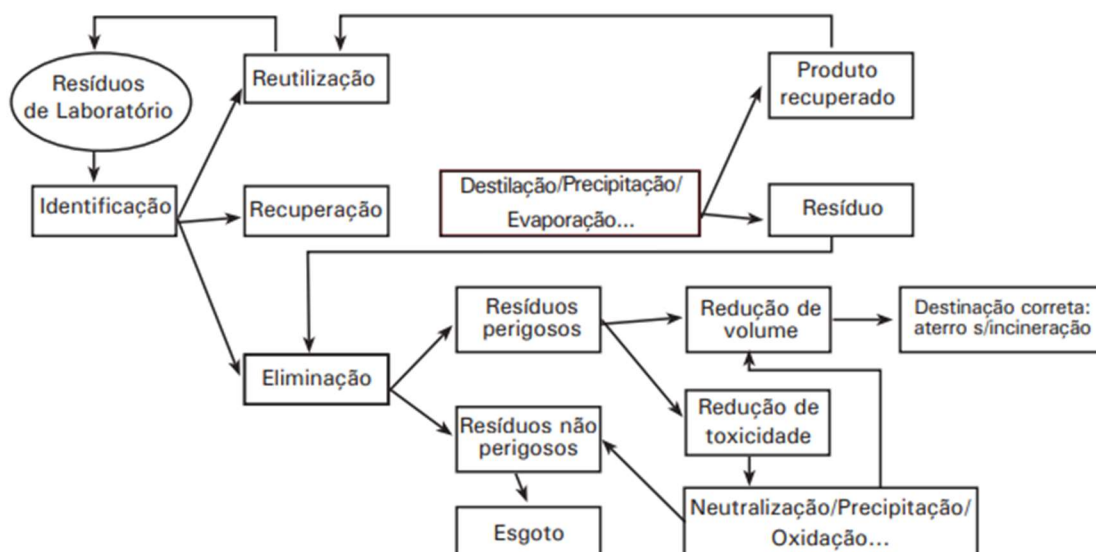
Figura 11 - Comparação do efluente bruto com o efluente tratado por foto-Fenton (Fe^{2+} 812 mg L⁻¹ / H₂O₂ 5646 mg L⁻¹), com radiação natural, em tempo de reação de 100 min



Fonte: Borba *et al.*, 2008

Desde 2003, a Embrapa Instrumentação criou o Programa de Gerenciamento de Resíduos de Laboratório (PGRL), com o intuito de buscar análises alternativas que gerem uma menor quantidade de resíduos e desenvolver tratamentos que permitam a reutilização de alguns materiais ou a redução de sua periculosidade, visando um descarte ambientalmente adequado. A Figura 12 apresenta o fluxograma das etapas dos resíduos no PGRL (Bresolin *et al.*, 2014).

Figura 12 - Fluxograma das etapas do resíduo no PGRL



Fonte: Bresolin *et al.*, 2014

Com a adoção do PGRL, foram tratados ou recuperados aproximadamente 2.850 kg de resíduos químicos, até 2013, conforme mostra a tabela 1, proporcionando uma economia de R\$ 28.500,00, já que não foi necessária a contratação de uma empresa para realizar a destinação final desses resíduos (Bresolin *et al.*, 2014).

Tabela 1 - Volume de resíduos de laboratório tratados (L) até 2013.

	Ácido/Base	Solventes	*DNS	Metálicos	Outros
Total	1548,27	256,12	747	274	25,75
%	54,5	9	26	9,5	1

*DNS - Ácido 3,5-dinitrossalicílico

Fonte: Bresolin *et al.*, 2014

O PGRL conta com um fotorreator (Figura 13), no qual o resíduo entra em contato com lâmpadas de emissão ultravioleta. Inicialmente o reator seria para

tratar resíduos contendo pesticidas por fotodegradação, porém, seu uso foi expandido para o tratamento de outros resíduos, como antibióticos e o ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) (Bresolin *et al.*, 2014).

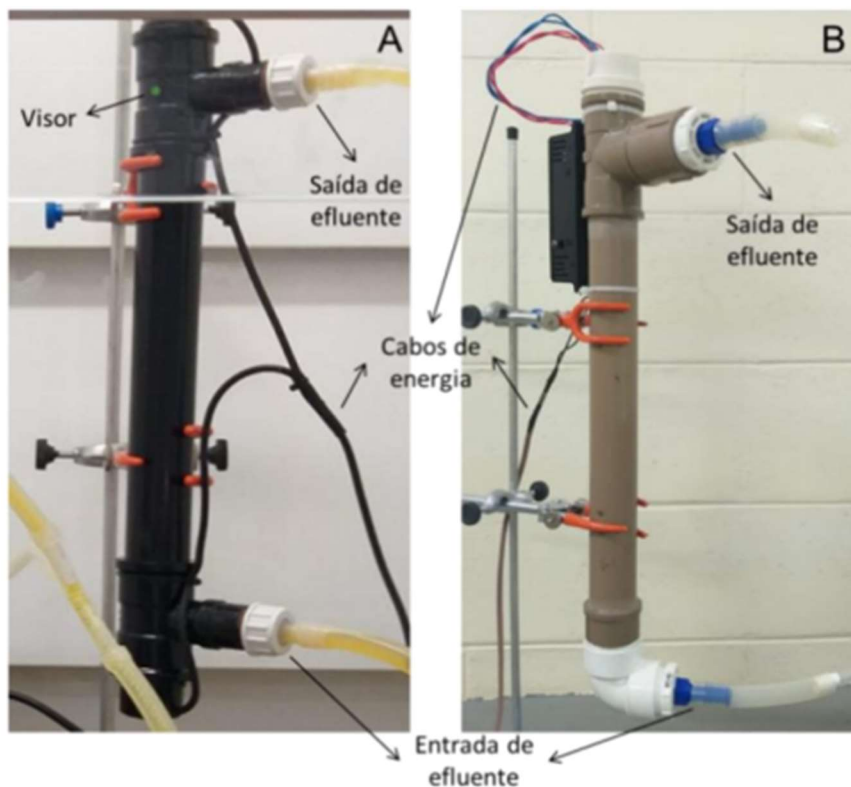
Figura 13 - Fotorreator desenvolvido na Embrapa Instrumentação para tratamento de resíduos



Fonte: Bresolin *et al.*, 2014

Vidotto (2022) elaborou um processo simples para a degradação do efluente da análise de açúcares redutores por DNS, visando a aplicação em laboratórios de pequeno e médio porte, como os laboratórios de ensino. Foi utilizado o POA por fotólise na presença de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) juntamente com lâmpadas UV de 25 e 95 W, cujos reatores podem ser observados na Figura 14.

Figura 14 - Modelos de fotorreatores utilizados: A) Fotorreator de baixa potência, com lâmpada de 25 W; B) Fotorreator de alta potência, com lâmpada de 95 W



Fonte: Vidotto, 2022

Após os ensaios conduzidos, exceto o ensaio 1 (pré - teste), o teor de fenólicos totais foi reduzido, em média, 10,4% do seu valor inicial, sendo que para o ensaio conduzido no reator com lâmpada de 95 W, foram necessárias 5h de fotólise e para o ensaio no reator com lâmpada de 25W, 48 h de fotólise.

Portanto, pode-se concluir que a degradação do efluente foi promissora, visto que houve uma redução média de 90,5% do teor de fenólicos totais e redução significativa do carbono orgânico total (COT), sendo a concentração final de 50 mg/L.

2.5. Resumo dos apontamentos da literatura

As Tabelas 2 e 3 apresentam um resumo das informações coletadas na revisão da literatura realizada neste trabalho.

Tabela 2 – Resumo dos Processos Oxidativos Avançados (POAs) aplicados no tratamento de efluentes contendo formol

POA	Autoria	Degradação (%)	Amostra	Resumo
Fenton	Rosenbrock, 2016	60-90	Laboratório de Biologia e Cultivo de Peixes de Água Doce e Laboratório de Camarões Marinhos	O estudo comparou a degradação pelo processo Fenton e pela Oxidação Química com K_2CrO_4 , $KmnO_4$ e H_2O_2 . O percentual de degradação do processo Fenton foi de 60 a 90% contra o percentual de 6 a 20% obtido pela Oxidação Química.
foto-Fenton	Kajitvichyanukul <i>et al.</i> , 2008	94	Formaldeído (37%)	A remoção do formaldeído e do metanol foi analisada pelos processos Fenton e foto-Fenton, tendo o foto-Fenton como o processo mais

			Fabricante: Merck	eficiente, com percentuais de 94% de remoção do formaldeído e 78% de remoção do metanol após 80 minutos de reação.
H ₂ O ₂ /UV	Guimarães <i>et al.</i> , 2012	91-98	Efluente do Laboratório de Anatomia IB UNICAMP	O estudo obteve como resultados a redução nos teores de CH ₂ O, COD, DQO e DBO nos valores de 91%, 48%, 46% e 53, respectivamente, após 420 minutos de reação.
Fotocatálise	Araújo, 2013	-	Efluente do Laboratório de Patologia Animal da UFRGS	Neste estudo não foi possível obter resultados satisfatórios, devido à uma possível contaminação do fotocatalisador.
H ₂ O ₂ /UV	Farah, 2007	91	Efluente do Laboratório de Anatomia IB UNICAMP	O estudo mostrou que os níveis de CH ₂ O, DQO, DQO e

DBO foram reduzidos em 91%, 48%, 46% e 53, respectivamente, após 420 minutos de reação.

Fonte: autoria própria

Tabela 3 – Resumo dos Processos Oxidativos Avançados (POAs) aplicados no tratamento de efluentes contendo fenol

POA	Autoria	Degradação (%)	Amostra	Resumo
H ₂ O ₂ /UV	Vidotto,2022	90,5	Efluente análise açúcares redutores DNS	O estudo obteve um percentual de 90,5% de redução no teor de fenólicos totais, sendo necessárias 5h de fotólise para a lâmpada UV de 95W e 48h de fotólise para a lâmpada de 25W.
foto-Fenton	Borba <i>et al.</i> , 2008	96		Os autores obtiveram como resultados 96% de redução na descoloração do efluente, 96% na

			Efluente preservante madeira	de de de redução da DBO, 88% de redução da DQO e 91% de redução dos Sólidos Totais Voláteis.
Ozonização e Adsorção	Souza, 2009	99,5	Efluentes petroquímicos sintéticos	Foram obtidos como resultados 99,5% de consumo de fenol da amostra e 87,8% de redução da DQO. Foi possível tratar 17 litros de efluente em 17 horas, quando os tratamentos são simultâneos e 5 litros de efluente em 5 horas quando só houve o processo de adsorção.
foto-Fenton	Lopes Neto, 2016	-	Efluente sintético	Foram analisadas as concentrações de fenol, de H ₂ O ₂ e de Fe ²⁺ . Concluiu-se que a concentração de H ₂ O ₂ foi a mais influente sobre a porção de COT degradada, de acordo com o tratamento de

				dados no software <i>Statistica</i> .
H ₂ O ₂ /UV	Zaidan <i>et al.</i> , 2014	96	Solução de fenol a 200 mg L ⁻¹	Como resultado das análises, conseguiu-se chegar ao percentual de 96% de COT mineralizado, fazendo com que o efluente estivesse dentro das exigências da resolução 437/2011 do CONAMA.
				Fonte: autoria própria

Fonte: autoria própria

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como objetivado neste trabalho, vemos que para o tratamento de efluentes contendo formol e fenol, a partir dos processos oxidativos avançados, existem diversos métodos descritos na literatura com excelentes resultados, como o processo Fenton, que confirmam a importância dos mesmos na degradação efetiva de tais compostos orgânicos.

Os resultados dos métodos de POA aplicados nos efluentes estudados ficaram dentro dos limites de descarte do CONAMA em corpos d'água, ou seja, esses efluentes puderam ser descartados de forma a não afetar o meio ambiente.

Essa revisão bibliográfica contribui, ainda, para apresentar possíveis soluções para o tratamento de efluentes gerados em laboratórios de ensino e pesquisa que contenham formol e fenol, contribuindo para uma gestão de efluentes e resíduos efetiva.

REFERÊNCIAS

ADÁRIO, Mariana Lima. **Utilização do processo Fenton homogêneo no tratamento de efluentes gerados em cabines de pintura da indústria moveleira**. 2014. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitarista) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014. Disponível em: https://www2.ufjf.br/engsanitariaeambiental//files/2014/02/TFC_Mariana-Lima-Ad%c3%a1rio.pdf. Acesso em: 22 out. 2023.

ADEWUYI, Yusuf G. Sonochemistry: environmental science and engineering applications. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [S.L.], v. 40, n. 22, p. 4681-4715, 1 out. 2001. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/ie010096l>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie010096l>. Acesso em: 03 nov. 2023.

ANGELO, Joana; ANDRADE, Luísa; MADEIRA, Luís Miguel; MENDES, Adélio. An overview of photocatalysis phenomena applied to NO_x abatement. **Journal of Environmental Management**, v. 129, p. 522-539, Set. 2013. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.08.006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.006>. Acesso em: 03 nov. 2023.

ARAÚJO, Karla Santos de; ANTONELLI, Raissa; GAYDECZKA, Beatriz; GRANATO, Ana Claudia; MALPASS, Geoffroy Roger Pointer. Advanced oxidation processes: a review regarding the fundamentals and applications in wastewater treatment and industrial wastewater. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal Of Applied Science**, [S.L.], v. 11, n. 2, p. 387-401, 15 abr. 2016. Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi). DOI: 10.4136/ambi-agua.1862. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1862>. Acesso em: 20 out. 2023.

ARAÚJO, Karla Santos de; MALPASS, Geoffroy Roger Pointer; URIAS, Patrícia Moisés; CUNHA, Paula Cordeiro Rodrigues da. Processos oxidativos

avançados: fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais e efluentes industriais. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 5., 2014, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: Ibeas – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2014. p. 1-9. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2014/II-033.pdf>. Acesso em: 26 out. 2023.

ARAÚJO, Marielle Brambilla de. **Avaliação de um sistema de tratamento de efluentes de laboratório de análises físico-químicas e microbiológicas**. 2013. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Químico Industrial) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/90055?show=full>. Acesso em: 27 set. 2023.

AZBAR, Nuri; YONAR, Taner; KESTIOGLU, Kadir. Comparison of various advanced oxidation processes and chemical treatment methods for COD and color removal from polyester and acetate fiber dyeing effluent. **Chemosphere**, v. 55, n. 1, p. 35-43, 2004. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2003.10.046. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.10.046>. Acesso em: 26 abr. 2023.

BORBA, Fernando Henrique; MÓDENES, Aparecido Nivaldo; PAGLIARI, João Henrique; MANENTI, Diego Ricieri; MORA, Nora Diaz. Aplicação do processo foto-Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ /radiação solar) em efluente de preservantes de madeira. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIAS PARA O MEIO AMBIENTE, 1., 2008, Bento Gonçalves. **Anais [...]**. Bento Gonçalves: Congresso Internacional de Tecnologias Para O Meio Ambiente, 2008. p. 1-8. Disponível em: https://siambiental.ucs.br/congresso/getArtigo.php?id=16&ano=_primeiro. Acesso em: 21 set. 2023.

BRESOLIN, Joana Dias; DIAS, Verônica Regina; SILVA, Wilson Tadeu Lopes da; HUBINGER, Silviane Zanni; SIMÕES, Marcelo Luiz. Programa de gerenciamento de resíduos de laboratórios da Embrapa Instrumentação. 14p. **Embrapa** - Comunicado Técnico 116, São Carlos, nov. 2014. ISSN 1517-4786.

BRILLAS, Enric; SIREs, Ignasi; OTURAN, Mehmet al...i. Electro-Fenton process and related electrochemical technologies based on Fenton's reaction chemistry. **Chemical Reviews**, v. 109, p. 6570-6631, 2009. DOI: 10.1021/cr900136g. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/cr900136g>. Acesso em: 26 abr. 2023.

BRITTO, Jaílides Marques; RANGEL, Maria do Carmo. Processos avançados de oxidação de compostos fenólicos em efluentes industriais. **Química Nova**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 114-122, 2008. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/ghMzbf9FX8d93wwJGBJTdXR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 03 nov. 2023.

BRITO, Núbia Natália de; SILVA, Victor Borges Marinho. Processos Oxidativos Avançados e sua aplicação ambiental. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, n.3, v.1, p.36-47, 2012. DOI: 10.5216/reec.v3i1.17000. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/reec.v3i1.17000>. Acesso em: 27 abr. 2023.

CETESB. **Ficha de Informação Toxicológica**. 2012. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/Formaldeido.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2023.

CETESB. **Ficha de Informação Toxicológica**. 2012. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Fenol.pdf>. Acesso em: 20 out. 2023.

CETESB. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2018/01/RESOLU%C3%87%C3%83O-No-430-DE-13-DE-MAIO-DE-2011.pdf>. Acesso em: 18 abr. 2023.

CHAKINALA, Anand Gupta; GOGATE, Parag R.; BURGESS, Arthur E.; BREMNER, David H. Industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing. **Chemical Engineering Journal**, p. 498-502, 2009. DOI: 10.1016/j.cej.2009.05.018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2009.05.018>. Acesso em: 25 abr. 2023.

COMPTON, Richard Guy; EKLUND, John C.; MARKEN, Frank; REBBITT, Thomas O.; AKKERMANS, Richard P.; WALLER, David N. Dual activation: coupling ultrasound electrochemistry-an overview. **Electrochimica Acta**, v. 42, p. 2919-2927, 1997. DOI: 10.1016/S0013-4686(97)00113-8. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-4686\(97\)00113-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-4686(97)00113-8). Acesso em: 25 abr. 2023.

FARAH, Carolina Rittes Turato. **Conjugação de processos físico químicos (UV; H₂O₂; UV/H₂O₂; Reagente De Fenton; Foto Fenton) e biológico (Lodos Ativados) para tratamento de águas residuárias contendo formol**. 2007. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unicamp.br/acervo/detalhe/407612>. Acesso em: 12 set. 2023.

GONZALEZ-GIL, Graciela; KLEEREBEZEM, Robbert; LETTINGA, Gatzke. Conversion and toxicity characteristics of formaldehyde in acetoclastic methanogenic sludge. **Biotechnology And Bioengineering**, [S.L.], v. 79, n. 3, p. 314-322, 11 jun. 2002. DOI: 10.1002/bit.10294. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/bit.10294>. Acesso em: 02 out. 2023.

GUIMARÃES, José Roberto; FARAH, Carolina Rittes Turato; MANIERO, Milena Guedes; FADINI, Pedro Sérgio. Degradation of formaldehyde by advanced oxidation processes. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 107, n. , p. 96-101, set. 2012. DOI: 10.1016/j.jenvman.2012.04.024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.024>. Acesso em: 21 out. 2023.

INCA - Instituto Nacional do Câncer José Alencar Gomes da Silva. **Ambiente, trabalho e câncer: Aspectos epidemiológicos, toxicológicos e regulatórios**. Disponível em: https://www.inca.gov.br/sites/ufu.sti.inca.local/files//media/document//ambiente_trabalho_e_cancer_-_aspectos_epidemiologicos_toxicologicos_e_regulatorios.pdf. Acesso em: 23 out. 2023.

INCA - Instituto Nacional do Câncer José Alencar Gomes da Silva. **Formol**. Disponível em: <https://www.gov.br/inca/pt-br/assuntos/causas-e-prevencao-do-cancer/exposicao-no-trabalho-e-no-ambiente/solventes/formol>. Acesso em: 23 out. 2023.

IARC - International Agency for Research on Cancer. **Chemical agents and related occupations: a review of human carcinogens**. Lyon, France: IARC, 2012.

KAJITVICHYANUKUL, Puangrat; LU, Ming-Chun; JAMROENSAN, Aditsuda. Formaldehyde degradation in the presence of methanol by photo-Fenton process. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 86, n. 3, p. 545-553, fev. 2008. DOI: 10.1016/j.jenvman.2006.12.016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.016>. Acesso em: 21 out. 2023.

LIMA, Maycon; FAJARDO, Ana; SANTOS, Elaine; SALES-SOLANO, Aline; SILVA, Djalma; MARTÍNEZ-HUITLE, Carlos. Oxidação anódica para descontaminação de um efluente contaminado com o herbicida glifosato utilizando anodo de diamante dopado com boro. **Química Nova**, [S.L.], v. 34, n. 5, p. 561-569, fev. 2021. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). DOI: 10.21577/0100-4042.20170715. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170715>. Acesso em: 22 out. 2023.

LOPES, Erisson Paulo Borges. **Desenvolvimento de protocolo de tratamento de resíduos de DNS**. 2018. 41 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/24263/1/DesenvolvimentoProtocoloTratamento.pdf>. Acesso em: 25 out. 2023.

LOPES NETO, Luiz Gonzaga. **Modelagem da degradação de fenol em efluentes aquosos através do processo de Foto-Fenton**. 2016. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/21180>. Acesso em: 20 set. 2023.

MARCONDES, Josiane Gasparini. **Tratamento de efluentes**. 2012. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) - Curso de Química, Fundação Educacional do Município de Assis, Assis, 2012. Disponível em: <https://cepein.femanet.com.br/BDigital/arqTccs/0911290473.pdf>. Acesso em: 24 out. 2023.

MARSELLI, Beatrice; GARCIA-GOMEZ, Jesus; MICHAUD, Pierre-André; RODRIGO, Manuel A.; COMNINELLIS, Christos. Electrogenation of hydroxyl radicals on boron-doped diamond electrodes. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 150, p. 79-83, 2003. DOI: 10.1149/1.1553790. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1149/1.1553790>. Acesso em: 29 ago. 2023.

NATIONAL INSTITUTES OF HEALTH. Division of Occupational Health and Safety. Formaldehyde surveillance program. Bethesda: NIH, 2018.

OPERSAN, Conheça Os Principais Métodos Para O Tratamento De Efluentes. *In*: Opersan Soluções Ambientais. **Blog Grupo Opersan**. São Paulo, 19 jan. 2022. Disponível em: <https://info.opersan.com.br/tratamentos-de-efluentes-e-os-principais-metodos-utilizados#:~:text=19%20de%20Janeiro%20de%202022,para%20outros%20fins%20n%C3%A3o%20pot%C3%A1veis>. Acesso em: 24 out. 2023.

PAGNO, Vanessa; SALAPATA, André; SCHIMTZ, Edinéia Paula Sartori; CABRERA, Liziara da Costa. Levantamento de resíduos de laboratórios, propostas de atividades experimentais e ações com foco em química verde. **Actio: Docência em Ciências**, [S.L.], v. 2, n. 2, p. 80, 9 set. 2017. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). DOI:10.3895/actio.v2n2.6812.

Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/actio/article/view/6812>. Acesso em: 23 out. 2023.

PIGNATELLO, Joseph J.; OLIVEROS, Esther; MACKAY, Alisson. Advanced oxidation processes of organic contaminant destruction based of the Fenton reaction and related chemistry. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 36, p. 1-84, 2006. DOI: 10.1080/10643380500326564. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/10643380500326564>. Acesso em: 25 abr. 2023.

PRIMO, Oscar; RIVERO, María José; ORTIZ, Inmaculada; IRABIEN, Angel. Mathematical modeling of phenol photooxidation: Kinetics of the process toxicity. **Chemical Engineering Journal**, v. 134, p. 23-28, 2007. DOI: 10.1016/j.cej.2007.03.061. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2007.03.061>. Acesso em: 25 maio 2023.

ROSENBROCK, Ligia Cleia Casas. **Estudo da degradação de formaldeído por processo Fenton**. 2016. 119 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Curso de Programa de Pós Graduação em Química, Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/167682>. Acesso em: 12 set. 2023.

ROOS, Alana; BECKER, Elsbeth Leia Spode. Educação ambiental e sustentabilidade. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, [S.L.], v. 5, n. 5, p. 857-866, 24 jan. 2012. DOI: 10.5902/223611704259. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/223611704259>. Acesso em: 07 out. 2023.

SANTIN, Roberta Clemente. **Avaliação da sensibilidade à mineralização e estudo detalhado da matéria orgânica em Espodossolos da alta bacia do Rio Negro, Amazonas**. 2017. Tese (Doutorado em Química na Agricultura e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017. doi:10.11606/T.64.2018.tde-07082018-104323. Acesso em: 02 dez. 2023.

SATHISHKUMAR, Panneerselvam; MANGALARAJA, Ramalinga Viswanathan; ANANDAN, Sambandam. Review on the recent improvements in sonochemical and combined sonochemical oxidation processes – A powerful tool for destruction of environmental contaminants. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 426–454, 2016. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.139. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.139>. Acesso em: 25 abr. 2023.

SILVA, Milady Renata Apolinário da; TROVÓ, Alam Gustavo; NOGUEIRA, Raquel Fernandes Pupo. Degradation of the herbicide tebuthiuron using solar photo-Fenton process and ferric citrate complex at circumneutral pH. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 191, p. 187-192, 2007. DOI: 10.1016/j.jphotochem.2007.04.022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jphotochem.2007.04.022>. Acesso em: 23 out. 2023.

SIRES, Ignasi; BRILLAS, Enric. Remediation of water pollution caused by pharmaceutical residues based on electrochemical separation and degradation technologies: A review. **Environmental International**, v. 40, p. 212-229, 2012. DOI: 10.1016%2Fj.envint.2011.07.012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.envint.2011.07.012>. Acesso em: 25 abr. 2023.

SOUZA, Fernanda Batista de. **Remoção de compostos fenólicos de efluentes petroquímicos com tratamentos sequenciais e simultâneos de ozonização e adsorção**. 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/92437>. Acesso em: 20 set. 2023.

VIDOTTO, Jéssica Carolina Dessibio. **Proposta de procedimento para tratamento de efluentes contendo ácido 3,5-dinitrosalicílico e fenol, oriundos da análise de açúcares redutores**. 2022. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Biosistemas) - Curso de Engenharia de Biosistemas, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Avaré.

Z Aidan, Lea Elias Mendes Carneiro; NAPOLEÃO, Daniella Carla; SALES, Renata Vitória de Lima; BENACHOUR, Mohand; SILVA, Valdinete Lins da. Degradação fotocatalítica do fenol utilizando H₂O₂ e BiPO₄ como catalisador, p. 9131-9138 . *In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014 [= Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2]*. DOI: 10.5151/chemeng-cobeq2014-1754-17720-174725. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5151/chemeng-cobeq2014-1754-17720-174725>. Acesso em: 03 nov. 2023.