

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

EFLUENTES INDUSTRIAIS CONTAMINADOS POR COMPOSTOS FENÓLICOS: PRINCIPAIS FORMAS DE TRATAMENTO

Eduardo Nardi Cunha¹, Eliza Couto Alexandre¹, Esdras de Oliveira Silva¹, Júlia Almeida de Abreu Moraes¹, Mateus Gonçalves dos Santos², Damaris Guimarães¹.

¹ Universidade Federal do Espírito Santo, Alto Universitário, S/N - 29.500-000 - Alegre - ES, Brasil, edunardi8@gmail.com, elizacoutto@gmail.com, esdras.oliv@hotmail.com, julia.abreumoraes14@gmail.com, damaris.guimares@ufes.br

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís, km 235 – 13.565-905 - São Carlos – SP, Brasil, mateusufsquimica@gmail.com.

Resumo

A ampla utilização de compostos fenólicos se evidencia em diversos ramos industriais, dentre os quais se destacam a produção de alimentos, fármacos, pesticidas, papel e celulose, assim como, em indústrias petroquímicas, metalúrgicas e no refino de óleo. Proporcionalmente ao elevado uso está a grande geração de efluentes industriais contaminados com tais compostos, o que representa um grande risco para o meio ambiente. Diante do exposto, este artigo aborda as principais técnicas de tratamento de efluentes industriais contendo compostos fenólicos por meio de revisão da literatura, destacando a necessidade de ações sustentáveis para reciclar e reutilizar esses efluentes, dada sua toxicidade para o ambiente aquático e a saúde humana. Dos trabalhos consultados, destacam-se a adsorção e os processos oxidativos avançados, visando soluções eficientes e de baixo custo. O estudo ressalta a relevância de pesquisas inovadoras para enfrentar esse desafio ambiental e de saúde pública.

Palavras-chave: Tratamento. Efluente. Industrial. Composto fenólico.

Área do Conhecimento: Engenharias (Engenharia Química)

Introdução

O tema de tratamento de efluentes industriais vem sendo explorado por vários grupos de pesquisa em todo o mundo, uma vez que a escassez de recursos hídricos passou a exigir ações intensificadas de reciclagem e reuso dos efluentes gerados pelas indústrias. Isso se soma à necessidade de alívio dos altos riscos potenciais do descarte desses efluentes, gerando a necessidade de novos conhecimentos e, consequentemente, de pesquisas que busquem associar ações de custo reduzido com alta eficiência (SILVA, 2020).

Os compostos fenólicos são empregados em várias indústrias como refinarias de óleo, farmacêuticas, petroquímicas, pesticidas, de papel e celulose e metalúrgicas. Além desses setores, fenóis são frequentemente usados para produção de uma multiplicidade de resinas, que podem ser empregadas na indústria automobilística, de resinas epóxi e adesivos, dentre outras aplicações (NAMANE; HELLAL, 2006; FREITAS *et al.*, 2020).

Fenóis e intermediários aromáticos são substâncias orgânicas perigosas que contaminam as correntes de efluentes industriais. A toxicidade destes compostos na água é de muita importância, pois suas concentrações em níveis de mg/L podem afetar o meio ambiente aquático com consequências drásticas para a flora e a fauna (BRANDÃO, 2012). De acordo com Özkaya (2005) e Srivastava *et al.* (2005), muitos desses componentes são conhecidos como toxinas cancerígenas e podem gerar efeitos tóxicos crônicos que afetam o ser humano como vômito, dificuldade de respirar, anorexia, dores de cabeça e outros distúrbios físicos e mentais.

Além dos impactos ambientais e de saúde pública associados à presença de compostos fenólicos nos corpos hídricos, destaca-se que tais compostos apresentam baixa biodegradabilidade, devido à

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

alta toxicidade, e a possibilidade de acúmulo no meio ambiente (LUZ-ASUNCIÓN *et al.*, 2015). Diante desses fatores, no Brasil, efluentes líquidos somente podem ser lançados diretamente no corpo receptor caso contenham no máximo $0,5 \text{ mg L}^{-1}$ de compostos fenólicos (BRASIL, 2011). Por ser um teor muito abaixo do observado nos efluentes diversos setores industriais (AGHAV; KHUMAR; MUKHERJEE, 2011), cabe às indústrias geradoras o tratamento de seus efluentes.

O tratamento de efluentes contendo compostos fenólicos pode ser feito por meio de diversas formas como degradação microbiana, adsorção, oxidação química e outros (DURSUN, 2005). Diante do exposto, esse trabalho busca compilar, mediante a uma revisão de literatura, as principais técnicas empregadas no tratamento de efluentes contaminados com compostos fenólicos.

Metodologia

A metodologia empregada neste estudo consistiu em uma revisão de literatura utilizando as bases de dados Google Acadêmico e Scopus. O foco da pesquisa foi a identificação de resíduos contaminados com compostos fenólicos gerados por diversas indústrias, bem como a análise dos procedimentos e desafios relacionados ao tratamento e à disposição final desses resíduos. Inicialmente, foram selecionados os termos-chave "tratamento", "efluentes", "industriais" e "compostos fenólicos" para conduzir a busca. A análise dos títulos e resumos dos trabalhos acadêmicos foi realizada para efetuar uma seleção abrangente. Os critérios de inclusão dos estudos basearam-se na identificação de abordagens de tratamento aplicáveis a efluentes contaminados com compostos fenólicos a fim de concluir qual é o que melhor equilibra vantagens e desvantagens para os setores industriais que lidam com este tipo de efluente.

Resultados

Fenóis são hidrocarbonetos aromáticos com os átomos de hidrogênio substituídos por hidroxilas. Normalmente estão presentes no estado físico sólido e possuem uma solubilidade moderada em água (ARAÚJO, 2003). Além disso, conforme, seu teor, os fenóis podem ser potencialmente prejudiciais à saúde humana, provocando problemas digestivos, necrose, danos em fígados e rins; sua presença em água pode causar a morte de consumidores e também da fauna aquática no caso de rios e mares (ÖZKAYA, 2005; SRIVASTAVA *et al.*, 2005; BRANDÃO, 2012).

Os compostos fenólicos são produzidos em diversos ramos industriais, todavia o de produção de papel e celulose, petróleo, alimentos e fármacos são os principais (RODRIGUES; SILVA; SILVA, 2010). O tratamento de efluentes industriais geralmente é dividido em quatro níveis: Preliminar, Primário, Secundário e Terciário. Ao nível preliminar é realizada a remoção de sólidos grosseiros em suspensão, com grades e desarenadores. Ao nível primário são retirados sólidos em suspensão sedimentáveis (aqueles que o nível preliminar é incapaz de retirar) e também a matéria orgânica em suspensão. Isso é feito a partir de ajustes químicos e adição de insumos em tanques de equalização, com posterior repouso do efluente em tanques de decantação com agitação mínima a fim dos sólidos decantarem e serem recolhidos. Ao nível secundário, um tratamento biológico é aplicado para decompor a matéria orgânica dissolvida e a em suspensão remanescente. Vários processos biológicos são utilizados: lagoas de estabilização, filtros biológicos, reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), lodos ativados, dentre outros. Por fim, ao nível terciário, diversas técnicas podem ser aplicadas para remover compostos específicos baseados na composição particular do efluente industrial (REBOUÇAS *et al.*, 2006).

Os fenóis necessitam ser tratados e retirados do efluente no nível terciário, uma vez que são solúveis em água e bastante resistentes à degradação biológica, devido a sua alta toxicidade (LUZ-ASUNCIÓN *et al.*, 2015). Os principais tratamentos abordados para fenóis englobam a coagulação/floculação/sedimentação, eletrocoagulação, Processos Oxidativos Avançados (POA's) e processos de adsorção em carvão ativado. Tais técnicas podem ser combinadas da forma necessária, de acordo com o processo e o efluente industrial. Dentre os tratamentos citados, os POA's e processos de adsorção são os mais largamente empregados, sendo que os processos de adsorção apresentam maior eficiência em ampla faixa de aplicabilidade (BENDER; SOUZA; VIDAL, 2019).

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Discussão

A técnica da coagulação química (floculação), seguida pela sedimentação e decantação, é empregada para tratar águas residuais com alta concentração de partículas sólidas em suspensão, especialmente aquelas compostas por materiais coloidais (SCHROEDER, 2016). A coagulação é um processo em que se adiciona uma substância chamada coagulante na água para desestabilizar as partículas nela suspensas. Essas partículas, também conhecidas como colóides, têm uma carga negativa em suas superfícies. A desestabilização acontece devido à reação de hidrólise quando o coagulante é adicionado à água e favorece a adsorção dessas espécies hidrolisadas na superfície das partículas coloidais. Os produtos químicos mais usados nas Estações de Tratamento de Água (ETAs) são sais de ferro ou alumínio, os quais reagem rapidamente na água e formam um sólido amorfo chamado $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ou $\text{Al}(\text{OH})_3$, respectivamente. Recentemente, têm sido pesquisados coagulantes feitos de compostos orgânicos e inorgânicos como alternativas, podendo substituir total ou parcialmente os coagulantes inorgânicos tradicionais (KAMIWADA; ANDRADE; REIS, 2020). Após a coagulação, os colóides são depositados no fundo de tanques pelo processo de sedimentação. Os sólidos são retirados ao longo do processo.

A eletrocoagulação (EC) é uma técnica de tratamento de efluentes que utiliza um processo eletroquímico. Nesse método, a oxidação dos eletrodos é responsável por criar o agente coagulante, eliminando a necessidade de adicionar produtos químicos e evitando a formação de poluentes adicionais. Por essas razões, o processo de eletrocoagulação tem se destacado no tratamento de efluentes industriais, sendo valorizado por sua flexibilidade e respeito ao meio ambiente. Comparado aos métodos convencionais, apresenta vantagens como menor tempo necessário, redução ou até mesmo ausência de uso de produtos químicos para promover a coagulação, resultando em menor produção de lodo. Todavia, demanda um consumo considerável de energia elétrica, criando um custo associado. A EC pode ser usada para tratar diferentes tipos de águas residuais, tais como aquelas provenientes de refinarias, ricas em óleos emulsionados, corantes, íons metálicos, nitrito, amônia, fluoreto, entre outros. Aplica-se à recuperação de compostos fenólicos, ao tratamento de águas residuais domésticas e da indústria petroquímica (PERTILE *et al.*, 2013). Os Processos Oxidativos Avançados consistem em realizar a oxidação dos poluentes presentes no efluente industrial, de forma que sejam reduzidos a substâncias inócuas, como dióxido de carbono e água. Para que isso aconteça, um agente oxidante com alto potencial padrão de redução é introduzido no efluente a fim de provocar a oxidação de contaminantes indesejados. No meio dos agentes oxidantes, o radical hidroxila se destaca muito, visto que seu potencial padrão de redução em meios ácidos é de 2,8 V, além de ser capaz de oxidar diversas espécies químicas. Os POA's são, então, formas de se produzir os radicais hidroxila para serem inseridos no efluente industrial (BRITTO, 2008; FREITAS *et al.*, 2020).

Várias abordagens são aplicadas para produção de radicais hidroxilas, porém a mais operada usa peróxido de hidrogênio, luz ultravioleta e alguns catalisadores. Esse processo ganha destaque porque suas condições de operação são próximas das condições ambientais ($T < 80^\circ \text{C}$, 0,1 - 0,5 MPa) e com a escolha adequada de um catalisador é possível efetuar a oxidação de um poluente específico, de forma a não atuar em outros. Tais processos apresentam grandes vantagens, uma vez que são extremamente rápidos; não geram resíduos voláteis; possuem capacidade de oxidar os mais variados compostos orgânicos; consomem pouca energia se comparado a outros métodos; removem contaminantes em concentrações baixas, em ordem de parte por bilhão (ppb). Apesar desses pontos, existem algumas dificuldades em sua aplicação, como a possível produção de compostos tóxicos; no uso de peróxido de hidrogênio, deve-se remover seu excedente ao final do processo; a seleção e/ou desenvolvimento de catalisadores eficientes e adequados para a aplicação (BRITTO, 2008).

A adsorção é um processo observado em certos materiais sólidos que apresentam a capacidade de concentrar em sua superfície certas substâncias encontradas em líquidos ou gases. Isso possibilita separá-las das outras substâncias presentes nesses meios fluidos. Quando os componentes ficam presos na superfície do sólido, quanto maior for essa superfície por quantidade do sólido, mais eficiente será o processo. A adsorção é amplamente usada na indústria devido à sua alta eficácia na remoção de certos componentes (SCHNEIDER, 2008). A adsorção de fenóis pelo carvão ativado é o método mais usado, pois tem uma excelente capacidade para capturar substâncias orgânicas de baixo peso molecular, como os fenóis. Além disso, o carvão ativado é um material muito poroso, o que resulta em uma grande área superficial. A capacidade de captura de compostos aromáticos no carvão ativado depende de vários fatores, como as características físicas e químicas do material e do meio no qual o

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

mesmo é submetido. Com relação ao material adsorvente, a composição química, os tipos de tratamento aplicados (químicos ou térmicos) o tamanho das partículas, o tipo e o volume dos poros, dentre outros. Quanto às condições do meio em que o adsorvente é empregado, pode-se citar o pH, a temperatura e a pressão ambiente (no caso de gases), o peso molecular e a concentração das substâncias que estão sendo capturadas etc. (OZAKAYA, 2005; SRIVASTAVA *et al.*, 2005; NAMANE; HELLAL, 2006; SCHNEIDER, 2008; AGHAV; KHUMAR; MUKHERJEE, 2011; LUZ-ASUNCIÓN *et al.*, 2015; SILVA, 2020).

A partir do exposto fica claro que todos os processos possuem suas singularidades e, para que uma aplicação mais eficiente seja desenvolvida, é preciso analisar o efluente industrial a ser tratado; se as espécies químicas contidas são facilmente oxidáveis, se há a presença muitos sólidos em suspensão, se a mistura como um todo não forma algum composto tóxico ao se adicionar determinados insumos, entre outros. Analisar apenas a presença de fenóis se torna insuficiente para apontar um procedimento ótimo a se adotar. Além disso, o fato de um dos processos ser mais eficaz em relação aos outros não implica que será a melhor opção em todos os cenários; uma vez que são muitos os parâmetros que interferem nos processos abordados.

Conclusão

A revisão de literatura abordando o tratamento de efluentes industriais contaminados com compostos fenólicos identificou várias técnicas eficazes. A coagulação/floculação/sedimentação/decantação demonstrou ser eficiente na remoção de destes compostos na forma de sólidos em suspensão, enquanto a eletrocoagulação se destacou por minimizar o consumo de produtos químicos, embora apresente um maior requerimento energético. Os POA's foram evidenciados por sua rápida velocidade de reação, mas demandam cuidados para evitar a formação de compostos tóxicos e o descarte indevido de agentes oxidantes no meio ambiente. Por sua vez, a adsorção em carvão ativado foi amplamente adotada nos trabalhos consultados devido à sua alta capacidade de capturar compostos orgânicos e alta eficiência. A seleção adequada da técnica de tratamento requer uma análise abrangente das características do efluente, incluindo a consideração de possíveis interações químicas. Uma abordagem criteriosa possibilitará a precisa seleção da técnica de tratamento, assegurando a eficácia e a segurança no tratamento de efluentes contendo fenóis.

Referências

AGHAV, R. M.; KUMAR, S.; MUKHERJEE, S. N. Artificial neural network modeling in competitive adsorption of phenol and resorcinol from water environment using some carbonaceous adsorbents. **Journal of Hazardous Materials**, v. 188, p. 67-77, 2011.

ARAÚJO, Mirella C. S. **Cinética experimental e resistências difusionais na oxidação úmida de compostos fenólicos utilizando catalisadores metálicos**. Dissertação de Mestrado. Natal, RN: UFRN, 2003. 100 p.

BENDER, A. F.; SOUZA, J. B.; VIDAL, C. M. S. Tecnologias avançadas de tratamento visando à remoção de cor e fenol de efluente de indústria de celulose e papel. **Ciência Florestal**, [S. l.], v. 29, n. 2, p. 571-582, 2019.

BRANDÃO, Yana Batista. **Tratamento Térmico por Contato Direto (DiCTT) de Efluentes Líquidos Fenólicos em uma Planta Semi- Industrial: Estudo Experimental e Modelagem do Processo por Redes Neurais Artificiais**. Orientadores: Prof. Dr. Mohand Benachour, Prof. Dr. Wagner Eustáquio de Vasconcelos. 2012. 260 p. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2012.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011.

BRITTO, J. M.; RANGEL, M. DO C.. Processos avançados de oxidação de compostos fenólicos em efluentes industriais. **Química Nova**, v. 31, n. 1, p. 114-122, 2008.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

DURSUM, A. Y.; KAKAYCI C. S. Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on the adsorption of phenol onto chitin. **Journal of Hazardous Materials**, v. 123, p. 151 - 157, 2005.

FREITAS, A. A. ; MAXIMIANO, B. S. ; GORING, P. R. ; GUIMARÃES, D. Tratamento da água residuária do café (ARC) bruta utilizando peróxido de hidrogênio. In: XXIX Congresso Nacional dos Estudantes de Engenharia Química, 2020, Belo Horizonte - MG. **Anais do XXIX Congresso Nacional dos Estudantes de Engenharia Química**, 2020.

KAMIWADA, W. Y.; ANDRADE, P. V.; REIS, A. G. Emprego do cloreto de polialumínio em estudos de tratabilidade de água de abastecimento via coagulação, floculação e sedimentação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 5, p. 667–676, 2020.

LUZ-ASUNCIÓN, M.; SÁNCHEZMENDIETA, V.; MARTÍNEZHERNÁNDEZ, A. L.; CASTAÑO, V. M.; VELASCO-SANTOS, C. Adsorption of phenol from aqueous solutions by carbon nanomaterials of one and two dimensions: kinetic and equilibrium studies. **Journal of Nanomaterials**, v. 2015, 2015.

NAMANE, A.; HELLAL, A. The Dynamic adsorption characteristics of phenol by granular activated carbon. **Journal of Hazardous Material**, v. 137, p. 18 – 25, 2006.

ÖZKAYA, B. Adsorption and desorption of phenol on activated carbon and a comparison of isotherm models. **Journal of Hazardous Materials**, v. 129 p. 158 – 163, 2005.

PERTILE, T. S., CARLESSO, J., BEAL, L. L., BIRRIEL, E. J. Estudo sobre os parâmetros de operação do processo de eletrocoagulação para o tratamento de efluentes da indústria galvânica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2013, Bento Gonçalves. **Água – Desenvolvimento Econômico e Socioambiental** [...]. Bento Gonçalves: [s. n.], 2013. P. 1-8. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/155/1763f62893966765d2d3f221320d1de4_ef25c8380f7aae13fe17288062c67009.pdf. Acesso em: 21 jul. 2023.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha *et al* (org.). **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. 3. Ed. São Paulo: Escrituras, 2006. 703 p.

RODRIGUES, G. D.; SILVA, L. H. M.; SILVA, M. C. H. Alternativas verdes para o preparo de amostra e determinação de poluentes fenólicos em água. **Química Nova**, v. 33, n. 06, p. 1370-1378, 2010.

SCHNEIDER, Eduardo Luiz. **Adsorption of phenolic compounds on 5ctive carbon**. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008.

SCHROEDER, Luiz H. **Tratamento físico-químico por coagulação-floculação-sedimentação de efluente de indústria de celulose**. 2016. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Química) – Departamento Acadêmico de Química e Biologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

SILVA, R. R. F. **Sistema híbrido de tratamento de efluente contaminado com fenol: degradação foto-oxidativa seguida de adsorção com carvão ativado**. 2021. 142 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2020.

SRIVASTAVA, V. C., SWAMY, M. M., MALL, I. D., PRASAD, B., MISHRA, I. M. Adsorptive removal of phenol by bagasse fly ash and activated carbon: Equilibrium, kinetics and thermodynamics. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 272, p. 89-104, 2005.