

DEGRADAÇÃO DE HIDROXIBENZENO EM ÁGUA USANDO O PROCESSO FENTON E FOTO-FENTON EM REATOR AGITADO COM/SEM LUZ UV

DEGRADATION OF HYDROXYBENZENE IN WATER USING THE FENTON AND PHOTO-FENTON PROCESS IN A MIXED REACTOR WITH/WITHOUT UV LIGHT

Keslei Rosendo da Rocha^{1*}, Eduarda Diully da Silva², João Pedro Querubino Pereira², Larissa Karen Nazareno Torres², Fabiane Assis Carvalho³

¹ Escola de Química e Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande – RS

² Universidade Presidente Antônio Carlos, Ipatinga-MG

³ Departamento de Engenharia Química, Universidade Presidente Antônio Carlos, Ipatinga – MG

*Autor para correspondência: kesleirosendo@gmail.com

Recebido em: 22/02/2018, Aceito em: 28/05/2018, Publicado em: 03/08/2018.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22407/1984-5693.2018.v10.p.69-80>.

RESUMO

Resíduos orgânicos representam um grande problema para o meio ambiente, sendo reduzir estes resíduos um dos maiores desafios atuais. Uma boa alternativa para degradação desses resíduos tem sido o uso de reações oxidativas. Essas reações atacam quimicamente a matéria orgânica, reduzindo-a a compostos menos tóxicos. Algumas das reações mais estudadas têm sido as reações de Fenton, por produzirem o radical hidroxila, que possui um alto poder oxidante. Neste trabalho foram feitas reações de Fenton e foto-Fenton buscando degradar hidroxibenzeno, um resíduo industrial. As reações foto-Fenton (reator 1) se mostraram muito superiores às reações Fenton (reator 2), com a degradação de hidroxibenzeno caindo de 17.55 mg para 0.29 mg no reator 1 num período reacional de 30 min sob agitação de 1000 rpm, com 6 lâmpadas de 6 W cada, na faixa de radiação de 365 nm, na condição de concentração dos reagentes Fenton iguais a 20 ppm ($\text{FeCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) e 200 ppm (H_2O_2), enquanto que no reator 2 sob as mesmas condições, excetuando-se as lâmpadas UV, a queda do hidroxibenzeno foi de 17.55 mg para 11.78 mg.

Palavras-chave: Oxidação; Meio Ambiente; Foto-reação.

ABSTRACT

Organic pollutants represent a major problem for the environment, and reducing these wastes is one of the greatest challenges today. A good alternative for the degradation of these residues has been

the use of oxidative reactions. These reactions chemically attack organic matter reducing it to less toxic compounds. Some of the most studied reactions have been the reactions of Fenton, because they produce the hydroxyl radical, which has a high oxidizing power. In this work, reactions of Fenton and photo-Fenton were made seeking to degrade hydroxybenzene, an industrial residue. The photo-Fenton reactions (reactor 1) were shown to be much higher than the Fenton reactions (reactor 2), with degradation of hydroxybenzene falling from 17.55 mg to 0.29 mg in reactor 1 in a reaction period of 30 min under stirring at 1000 rpm, with 6 lamps of 6 W each, in the radiation range of 365 nm, at the concentration of the Fenton reagents of 20 ppm ($\text{FeCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) and 200 ppm (H_2O_2), while in reactor 2 under the same conditions, except for UV lamps, the decrease in hydroxybenzene was from 17.55 mg to 11.78 mg.

Keywords: Oxidation; Environment; Photo-reaction.

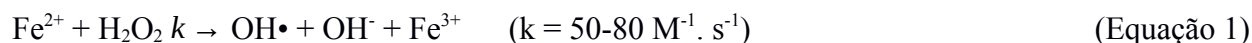
INTRODUÇÃO

No fim do século XVIII, período este que experimentava a revolução industrial, o êxodo rural era intenso e se mostrava preocupante nas principais cidades europeias, pois era o principal responsável pelo acúmulo de lixo e excremento nas ruas e conseqüentemente nos rios, uma vez que historicamente as cidades eram construídas às margens destes, para facilitar a obtenção de água (ROCHA *et al.*, 2009). O aumento expressivo e descontrolado da população, associado ao aumento de doenças típicas de águas e solos contaminados por micro-organismos patogênicos, impulsionou o desenvolvimento de um sistema de tratamento da água captada dos rios. Segundo Rocha *et al.* (2009), a primeira estação de tratamento de água (ETA) foi construída em Londres em 1829, que apenas filtrava em areia a água do rio Tâmsa. Com o passar do tempo, o processo foi sendo aprimorado e técnicas como cloração foram adicionadas para garantir qualidade à água ingerida.

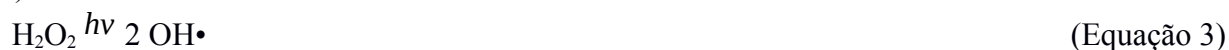
Um engenheiro londrino chamado Joseph Bazalgette, concluiu em 1865 a principal parte daquela que seria a primeira rede de esgoto do mundo, sendo esta uma obra que resolveria os problemas de mau cheiro e de doenças que assolavam os milhões de cidadãos daquela cidade (BBC, 2014). Já no Brasil, o Rio de Janeiro foi o responsável por construir, em 1864, o primeiro sistema de coleta de esgoto brasileiro, sendo esta a quinta cidade do mundo a contar com tal sistema (SOUZA, 2009). O estado de São Paulo foi o primeiro a dispor, através de decreto, sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente, atingindo principalmente a indústria e seus efluentes, induzindo-as a criarem suas próprias estações de tratamento de efluentes para se adequarem ao decreto (ASSEMBLEIA LEGISLATIVA, 1976).

Nos dias de hoje, a indústria petroquímica se mostra como uma das mais preocupadas com o tratamento da água usada nos seus processos, visto que os efluentes desta indústria são extremamente tóxicos ao meio ambiente e as multas por descumprimento são milionárias (ROCHA *et al.*, 2016). Um dos principais compostos químicos liberados nos efluentes desta indústria são os fenóis, dentre eles o mais comum: o hidroxibenzeno.

Segundo a resolução nº 430, de 13 de maio de 2011, o teor máximo de hidroxibenzeno (C_6H_5OH) permitido nos efluentes é de 0,5 mg/L, visando preservar a qualidade da água dos rios (CONAMA, 2011). A legislação, no entanto, não leva em conta a acumulação desta substância nos rios. Com o passar do tempo, a quantidade de hidroxibenzeno nos rios pode superar os limites de segurança, uma vez que esta substância pode se acumular mudando a qualidade de vida da fauna e flora ali presentes. Para degradação do hidroxibenzeno, este trabalho propôs o uso das reações de Fenton e foto-Fenton. Ambas as reações são baseadas na produção do radical hidroxila, que é o responsável por atacar a matéria orgânica presente, visto que seu potencial de oxidação é elevado (2,80 V), sendo este processo conhecido como POA, ou ainda, processo oxidativo avançado (SILVA *et al.*, 2018). Ao reagir com os compostos orgânicos há a produção de dióxido de carbono e água, ou produção de produtos mais fáceis de serem degradados por etapas posteriores de tratamento, ou mesmo no meio ambiente. Santos *et al.* (2017) relata que para baixas concentrações de H_2O_2 , os íons Fe^{2+} serão os favorecidos na reação de Fenton (equação 1), mas se altas concentrações de H_2O_2 forem usadas, haverá maior formação do radical hidroxila que oxidará o Fe^{2+} , reduzindo assim sua disponibilidade (equação 2) e conseqüentemente interferindo na eficiência da reação de degradação da matéria orgânica. Além da redução da disponibilidade dos íons Fe^{2+} , a forte presença dos íons Fe^{3+} induzem a uma cinética desfavorável quando comparada com a cinética da reação de Fenton com íons Fe^{2+} , conforme equações 1 e 2 abaixo, onde k é a constante cinética.



Para as reações de foto-Fenton, a diferença está no uso de luz ultravioleta para acelerar a formação do radical hidroxila ($OH\cdot$) e conseqüentemente favorecer os processos oxidativos avançados, levando a um aumento na capacidade e velocidade de degradação da matéria orgânica. A reação de formação do radical hidroxila segue abaixo na equação 3, descrita por Vieira *et al.* (2018).



É nesta perspectiva que o presente trabalho se enquadra, sendo seu objetivo adaptar com lâmpadas ultravioletas um reator e promover reações oxidativas, aqui realizadas pela rota Fenton e foto-Fenton, buscando como resultado reduzir o teor do fenol hidroxibenzeno de um efluente industrial petroquímico simulado a índices que, no mínimo, se enquadrem no limite estabelecido pela legislação.

MATERIAL E MÉTODOS

Preparo das soluções reagentes

Prepararam-se três soluções reagentes: hidroxibenzeno (C_6H_6O 99% P.A. Synth); peróxido de hidrogênio [H_2O_2 35 % (D 1.130 g/mL) P.A Synth] e cloreto de ferro II tetra-hidratado [$FeCl_2 \cdot 4 H_2O$ 97,5 % (M.M. 198,7 g/mol) P.A. Metaquímica]. As concentrações foram preparadas conforme tabela 1 abaixo, todas para um volume final de 1 L. Usou-se água destilada como solvente.

As massas e concentrações de cloreto de ferro II tetra-hidratado na tabela 1 foram calculadas para fornecerem apenas as concentrações de Fe^{2+} na solução. As massas calculadas levaram em conta a correção da pureza de cada composto.

Tabela 1. Concentração (ppm) e massa (mg) das soluções reagentes preparadas

$\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$		H_2O_2		$\text{FeCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O} (\text{Fe}^{2+})$	
ppm	mg	ppm	mg	ppm	mg
30	30.30	50	142.86	5	18.25
40	40.40	100	285.71	10	36.50
50	50.50	150	428.57	15	54.75
60	60.60	200	571.45	20	73.00

Geração de cor

Para gerar cor, recurso necessário ao método de detecção por espectrofotometria de absorção molecular (EAM-UV), usaram-se quatro reagentes: 4-aminoantipirina ($\text{C}_{11}\text{H}_{13}\text{N}_3\text{O}$ 99% MERCK); hidróxido de sódio (NaOH 97% EXODO); hidróxido de amônio (NH_4OH 30% P.A. DINÂMICA) e ferrocianeto de potássio tri-hidratado ($\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$ 98.5% VETEC). Foram preparadas duas soluções: a solução geradora de cor 1 que consistiu em 0.2% (m/v) de 4-aminoantipirina ajustada até pH 11 com solução de NaOH 1 M, e a solução geradora de cor 2 que consistiu em 0.1% (m/v) de ferrocianeto de potássio em solução tampão de amônia (pH 8.5), baseado na metodologia do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (EATON e GREENBERG, 1995). A Reação entre 4-aminoantipirina e hidroxibenzeno em meio ao ferrocianeto de potássio e uma fonte de ânions OH^- (NaOH), resulta em um complexo de cor marrom. Esta reação está representada na figura 1 abaixo.

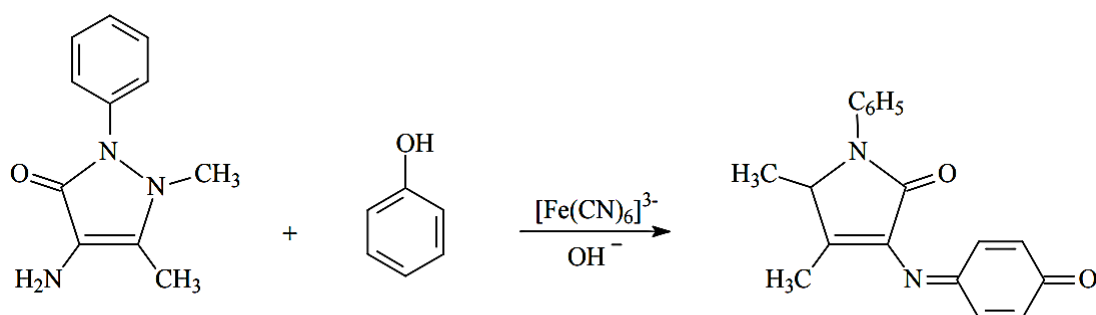


Figura 1. Reação para geração de cor e detecção do teor de hidroxibenzeno.

Para leitura, utilizou-se um espectrofotômetro Biospectro SP 220, cubetas de vidro e comprimento de onda de 490 nm (EATON e GREENBERG, 1995).

Preparo das curvas-padrão

Para calibrar o equipamento preparou-se o branco, que consistiu na adição de 150 μL da solução geradora de cor 1 e 500 μL da solução geradora de cor 2 em 5 mL de água destilada (volume da cubeta \approx 5 mL). O equipamento foi calibrado com este branco de forma que a absorbância após este procedimento fosse 0.000.

Como este trabalho usou 4 diferentes concentrações dos reagentes (tabela 1), foram preparadas quatro diferentes curvas-padrão, uma para cada diferente concentração de Fe^{2+} e H_2O_2 . Para cada diferente concentração destes, variou-se a concentração do hidroxibenzeno, conforme tabela 2 abaixo.

Tabela 2. Sistemas para geração das curvas-padrão

Sistema	$C_{\text{H}_2\text{O}_2}$	$V_{\text{H}_2\text{O}_2}$	$C_{\text{Fe}^{2+}}$	$V_{\text{FeCl}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}}$	$C_{\text{C}_6\text{H}_6\text{O}}$	$V_{\text{C}_6\text{H}_6\text{O}}$	$V_{\text{diluição}}$
1 α	50	50	5	50	30	10	40
1 β	50	50	5	50	40	10	40
1 γ	50	50	5	50	50	10	40
1 δ	50	50	5	50	60	10	40
2 α	100	50	10	50	30	10	40
2 β	100	50	10	50	40	10	40
2 γ	100	50	10	50	50	10	40
2 δ	100	50	10	50	60	10	40
3 α	150	50	15	50	30	10	40
3 β	150	50	15	50	40	10	40
3 γ	150	50	15	50	50	10	40
3 δ	150	50	15	50	60	10	40
4 α	200	50	20	50	30	10	40
4 β	200	50	20	50	40	10	40
4 γ	200	50	20	50	50	10	40
4 δ	200	50	20	50	60	10	40

Onde: C = Concentração (ppm) e V = volume (mL)

Em diferentes béqueres foram adicionadas as soluções conforme tabela 2 acima. Para cada linha um diferente béquer, totalizando 16 béqueres. Cada béquer representou um sistema. Estes sistemas foram divididos em quatro diferentes blocos (1, 2, 3 e 4). Como as diferentes concentrações dos reagentes geram leituras diferentes, fez-se necessária a geração de 4 curvas-padrões diferentes, uma para cada bloco. O volume final de todos os sistemas foi o mesmo: 150 mL. O volume de diluição foi representado pela água destilada, usada apenas para atingir o volume final desejado e manter a faixa de leitura no equipamento. Após o preparo de cada um dos 16 sistemas, coletaram-se 5 mL de cada sistema previamente homogeneizado, adicionaram-se 150 μL da solução geradora de cor 1 e 500 μL da solução geradora de cor 2 sobre estes 5 mL, e procedeu-se com a leitura no espectrofotômetro previamente calibrado. Cada um dos quatro blocos gerou uma regressão linear diferente, com R^2 diferente.

Reatores

Foram elaborados e utilizados dois diferentes reatores: o reator 1 para as reações foto-Fenton (com UV) e reator 2 para as reações Fenton (sem UV). Para o reator 1, utilizou-se um béquer de borossilicato de 5000 mL de capacidade (simulando um reator circular), um agitador mecânico (QUIMIS Q235-2) com braço de ferro revestido com polietileno (simulando o agitador do reator), 6 lâmpadas UV (PRO-TOOLS) de 365 nm de comprimento de onda e 6 W de potência cada, dispostas externamente ao redor do béquer em posição vertical, e uma câmara metálica revestida com tinta preta fosca para acondicionar todo o sistema e impedir vazamento de radiação. Para o reator 2, utilizou-se um béquer de mesma capacidade e um agitador mecânico idêntico ao usado no reator 1. Os reatores estão representados pela figura 2 abaixo.

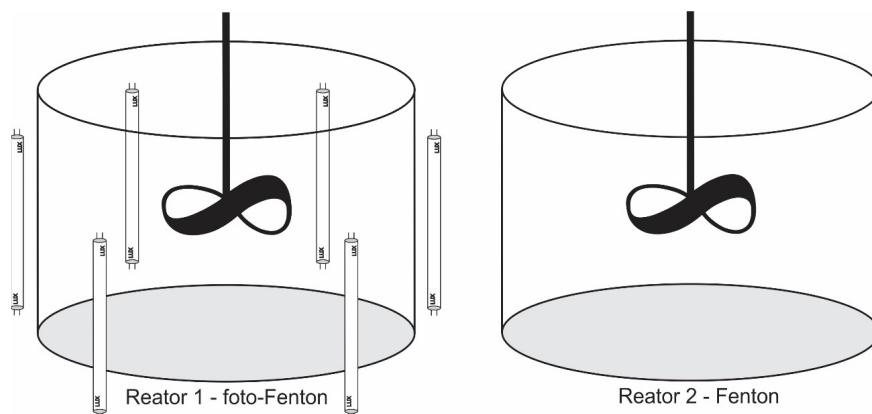


Figura 2. Reatores experimentais. Reator 1 com lâmpadas UV para reação foto-Fenton e reator 2 sem UV para reações Fenton.

Após preencher o reator 1 com o efluente simulado (representado pela solução de hidroxibenzeno) e adicionar as soluções reagentes de Fenton, acionou-se a agitação mecânica para que esta permanecesse em 1000 rpm (rotações por minuto) durante todo o processo. Acionou-se o sistema de lâmpadas simultaneamente à rotação, todas as 6 lâmpadas, mantendo-as em funcionamento durante todo o procedimento. Para uma comparação entre a eficiência das reações de Fenton (sem UV) e as reações de foto-Fenton (com UV), o reator 2 foi preenchido com as mesmas soluções nas mesmas concentrações que no reator 1 e agitado a 1000 rpm simultaneamente ao reator 1. As concentrações, volume das soluções e o tempo de reação se encontram na tabela 3 abaixo.

Hosseini (2005), determinou que o pH ótimo para as reações de Fenton e foto-Fenton é o pH 3. Para alcançar este valor e favorecer a reação, adicionou-se HCl 0,1 M monitorado com um pHmetro (Marte MB10). Este procedimento foi feito tanto para o sistema reacional 1 quanto o 2.

Uma a uma, as 4 bateladas foram realizadas em ambos os reatores. Alíquotas de 5 mL foram coletadas em triplicatas no tempo 0 min, 10 min, 20 min e 30 min em ambos os reatores. As alíquotas passaram pelo processo de geração de cor com adição de 150 μ L da solução geradora de cor 1 e 500 μ L da solução geradora de cor. Posteriormente foram lidas em 490 nm no espectrofotômetro (Biospectro SP 220) previamente calibrado.

Tabela 3. Condições de reação nos reatores 1 e 2

Batelada	C ₆ H ₆ O		H ₂ O ₂		FeCl ₂ . 4 H ₂ O (Fe ²⁺)		H ₂ O
	ppm	mL	ppm	mL	ppm	mL	mL
1	30	300	50	1500	5	1500	1200
2	40	300	100	1500	10	1500	1200
3	50	300	150	1500	15	1500	1200
4	60	300	200	1500	20	1500	1200

Onde: ppm = concentração (parte por milhão) da solução estoque a ser usada
mL = volume da solução estoque correspondente que será utilizado (em mililitros)

Testes dos parâmetros de agitação e iluminação

Além do teste Fenton x foto-Fenton, foram feitos ainda outros testes para o reator 1, alterando os parâmetros das lâmpadas e da agitação. Na tabela 4 estão os testes realizados. A massa inicial foi obtida a partir da batelada 4 da tabela 3.

Tabela 4. Testes no reator 1 alternando os fatores incidência UV e agitação

Nº do teste	Parâmetro testado	rpm	Nº de lâmpadas ligadas	Massa inicial de C ₆ H ₆ O (mg)
1	UV	1000	6	17.55
2	UV	1000	5	17.55
3	UV	1000	4	17.55
4	UV	1000	3	17.55
5	UV	1000	0	17.55
6	Agitação	800	6	17.55
7	Agitação	600	6	17.55
8	Agitação	400	6	17.55
9	Agitação	200	6	17.55
10	Agitação	0	6	17.55

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas-padrão e os respectivos coeficientes de determinação (R²) geradas para os 4 blocos dos 16 sistemas, foram:

Bloco 1 (1 α , 1 β , 1 γ e 1 δ): $y = 20.151x - 0.0167$ R² = 0.9962

Bloco 2 (2 α , 2 β , 2 γ e 2 δ): $y = 14.145x - 0.0005$ R² = 0.9976

Bloco 3 (3 α , 3 β , 3 γ e 3 δ): $y = 15.715x - 0.0005$ R² = 0.9904

Bloco 4 (4 α , 4 β , 4 γ e 4 δ): $y = 16.32x + 0.0157$ R² = 0.9775

Com o auxílio das curvas-padrão acima, cada batelada da tabela 3 foi representada pelo respectivo bloco. Desta forma, foi possível calcular com precisão o decaimento da massa de hidroxibenzeno no interior de cada reator em cada diferente condição (batelada), uma vez que a quantidade inicial era conhecida na preparação das soluções. Considerando o Y das curvas-padrão acima a absorbância e o X a massa (em mg) de hidroxibenzeno, após as leituras nos tempos 0, 10, 20 e 30 min, chegou-se à figura 3.

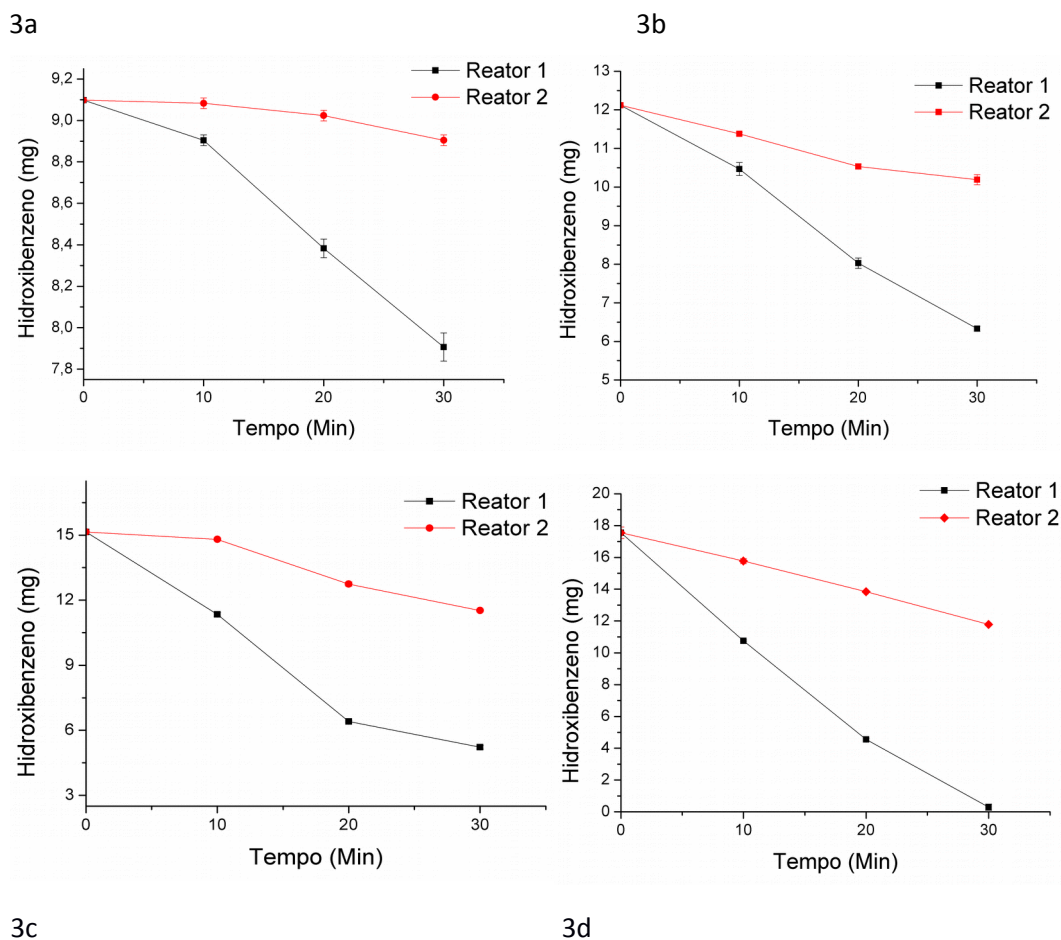


Figura 3. Resultados comparativos entre as bateladas ao longo do tempo de reação. Onde 3a = batelada 1, 3b = batelada 2, 3c = batelada 3 e 3d = batelada 4, de acordo com a tabela 3.

Os resultados da figura 3 indicam que o aumento da concentração dos reagentes Fenton favoreceram a degradação do hidroxibenzeno, e que quando houve uso de luz UV a degradação foi maior. Na batelada 1 (figura 3a), quando a concentração dos reagentes oxidativos era a menor, a massa de hidroxibenzeno no reator 1 pouco variou (de 9.09 ± 0.00 para 7.90 ± 0.07 mg). Já na batelada 4 (figura 3d), a quantidade de hidroxibenzeno foi praticamente eliminada do meio aquoso no reator 1 (de 17.5 ± 0.36 para 0.3 ± 0.20 mg), ficando abaixo do limite estabelecido pelo CONAMA (0.5 ppm). Para o reator 2, a massa de hidroxibenzeno teve pouca redução em praticamente todas as bateladas, sendo a batelada 4 a que houve maior redução (de 17.5 ± 0.36 para 11.8 ± 0.06 mg).

Considerando-se a queda na massa do hidroxibenzeno tanto no reator 1 quanto no reator 2 no tempo total de reação (30 min), fez-se a comparação entre a massa final de hidroxibenzeno nos reatores, conforme figura 4 abaixo. Fez-se ainda uma análise de variância nesta comparação, aplicando-se o teste Tukey a um nível de significância de 5%. Os pressupostos de independência, homocedasticidade e normalidade dos resíduos foram feitos e se mostraram adequados. O teste foi realizado no *software* licenciado Statistica 7.0.

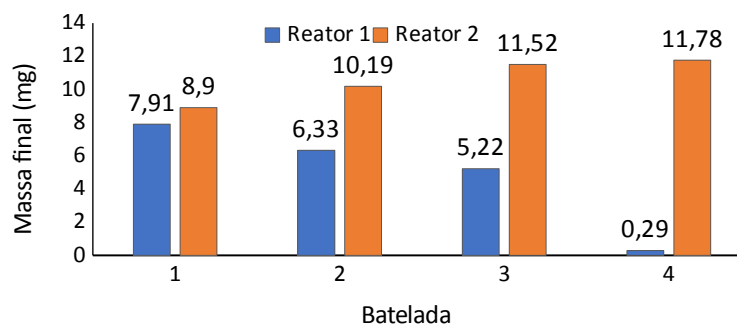


Figura 4. Comparação estatística da massa final presente nos reatores após o tempo total de reação.

Pela figura 4 acima, foi possível identificar que em todas as bateladas a média da massa final se mostrou estatisticamente superior no reator 2, enquanto que no reator 1 a média da massa final se mostrou com perfil decrescente, sendo a batelada 4 a de maior disparidade entre os reatores 1 e 2. Nesta mesma batelada, a massa final de hidroxibenzeno no reator 1 foi próxima de zero, mostrando assim eficiência no processo de degradação deste composto. Já no reator 2, para a mesma batelada, praticamente não houve redução na concentração do fenol.

Testes de incidência UV e agitação

Com os resultados anteriores, o reator 1 com a batelada 4 se mostrou o mais eficiente. Sendo assim, o respectivo reator e batelada foram utilizados para conduzir os testes da tabela 4. Os resultados para os testes estão na tabela 5. A massa inicial de hidroxibenzeno utilizada foi a da melhor condição encontrada anteriormente, que foi a condição da batelada 4 do reator 1. Assim, para os 8 testes da tabela 5, o reator foi preparado com os reagentes conforme batelada 4 da tabela 3. O tempo de reação foi de 30 minutos para cada teste. As lâmpadas foram apagadas de forma alternada.

Os resultados na tabela 5 indicam que com as 6 lâmpadas UV ligadas e irradiando sobre o sistema reacional, a quantidade de hidroxibenzeno degradada era maior que quando não havia nenhuma lâmpada UV irradiando sobre o sistema. A diminuição da quantidade de lâmpadas ligadas influenciou na quantidade de hidroxibenzeno degradado.

Tabela 5. Resultados dos testes de incidência UV e agitação. Letras minúsculas ou maiúsculas iguais na mesma coluna, significa que não houve diferença estatística a um nível de significância de 5% (p -valor > 0.05).

Nº do teste	Parâmetro testado	rpm	Nº de lâmpadas ligadas	Massa inicial de C ₆ H ₆ O (mg)	Massa final de C ₆ H ₆ O (mg)
1	UV	1000	6	17.55	0.29 ± 0.20 e
2	UV	1000	5	17.55	1.42 ± 0.18 d
3	UV	1000	4	17.55	2.96 ± 0.32 c
4	UV	1000	3	17.55	4.23 ± 0.15 b
5	UV	1000	0	17.55	11.78 ± 0.06 a
6	Agitação	800	6	17.55	0.30 ± 0.07 A
7	Agitação	600	6	17.55	0.32 ± 0.08 A
8	Agitação	400	6	17.55	0.33 ± 0.05 A
9	Agitação	200	6	17.55	0.38 ± 0.05 A
10	Agitação	0	6	17.55	0.40 ± 0.03 A

Estatisticamente, cada lâmpada apagada foi significativa, fazendo com que cada média para cada um dos testes de 1 a 5 fossem diferentes, conforme tabela 5 acima e figura 5 abaixo. Através da figura 5, foi observado que a quantidade de hidroxibenzeno degradado foi estatisticamente influenciada pela exposição do sistema ao ultravioleta. O teste 1 se mostrou o de maior eficiência na degradação do hidroxibenzeno, enquanto que o teste 5 se mostrou o menos eficiente para o mesmo fim, comprovando a eficiência do uso de luz UV para catalisar a reação.

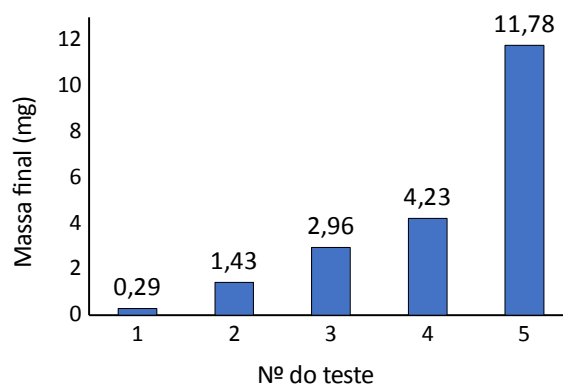


Figura 5. Massa final de hidroxibenzeno para os testes 1 a 5 variando a luz UV.

Mota (2005) observou que quando não havia nenhuma lâmpada UV acionada, após 30 minutos de reação a degradação de hidroxibenzeno foi de 115.1 ppm para 80 ppm. Quando acionadas 3 lâmpadas, a degradação foi de 111.1 ppm para 70.4 ppm após o mesmo tempo. Quando as 6 lâmpadas estavam acionadas, a queda foi de 113.6 ppm para 60.3 ppm, após o mesmo tempo. Os resultados na figura 6 representam os testes 6 a 10.

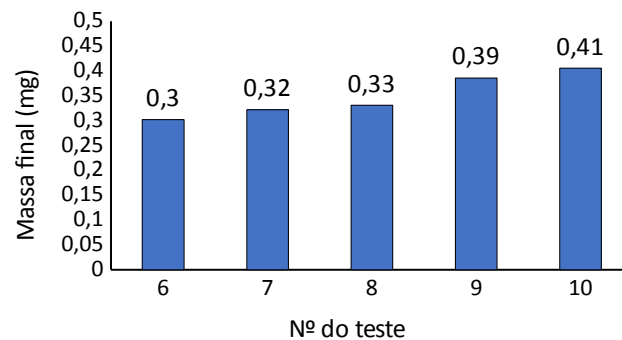


Figura 6. Massa final de hidroxibenzeno para os testes 6 a 10 variando a agitação.

Para a agitação, a massa final de hidroxibenzeno nos testes de 6 a 10 se mostraram estatisticamente iguais (tabela 5 e figura 6). Isso indicou que a agitação não influenciou de forma significativa na degradação do hidroxibenzeno, provavelmente porque o reator é transparente e as lâmpadas foram posicionadas de forma a atingirem todo o conteúdo do reator uniformemente, fazendo assim com que a agitação não fosse relevante. Geralmente a agitação favorece a reação por aumentar o choque entre as moléculas dos reagentes, mas pelos testes 6 a 10, o aumento desses choques se mostrou não significativo para o aumento da degradação do hidroxibenzeno, a um nível de significância de 5% e para os reagentes nas concentrações utilizadas, além do tempo total de reação adotado.

CONCLUSÕES

A reação foto-Fenton se mostrou superior à reação Fenton na degradação do hidroxibenzeno. Sobre as concentrações dos reagentes de Fenton de 20 ppm ($\text{FeCl}_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$) e 200 ppm (H_2O_2), o tempo de 30 min foi suficiente para reduzir praticamente todo o hidroxibenzeno presente no reator 1.

Os testes realizados indicaram que a agitação pode não ser significativa, dependendo do arranjo das lâmpadas e da incidência luminosa.

Os testes mostraram ainda que a quantidade de radiação UV irradiada sobre o reator 1 foi fator determinante e significativo em todos os testes, indicando que a reação foto-Fenton é fortemente influenciada pela disponibilidade da luz ultravioleta.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com apoio financeiro da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSEMBLEIA LEGISLATIVA. Dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1976/decreto-8468-08.09.1976.html>>. Acesso em: 29 mar. 2018.

- BBC. British Broadcasting Corporation - Figuras históricas: Joseph Bazalgette. Disponível em: <http://www.bbc.co.uk/history/historic_figures/bazalgette_joseph.shtml>. Acesso em: 29 mar. 2018.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente - Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/propresol_lanceflue_30e31mar11.pdf>. Acesso em 29 mar. 2018.
- EATON, A. D.; CLESCERI, L.S.; GREENBERG, A. E. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19. ed. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, 1995.
- HOSSEINI, S. H.; BORGHEI, S. M. The treatment of phenolic wastewater using a moving bed bio-reactor. *Process Biochemistry*, v. 40, n. 1, p. 1027–1031, 2005.
- MOTA, A. L. N. *Desenvolvimento de um reator fotoquímico aplicável no tratamento de efluentes fenólicos presentes na indústria do petróleo*. 2005. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2005.
- ROCHA, J. C.; ROSA, A. H.; CARDOSO, A. A. *Introdução à química ambiental*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- ROCHA, K. R.; SILVA, E. D.; PEREIRA, J. P. Q.; TORRES, L. K. N.; CARVALHO, F. A., A. *Avaliação de viabilidade econômica de um reator fotoquímico para desativação fotocatalítica de hidroxibenzeno presente nos efluentes da indústria petroquímica*. 2016. 73 f. Monografia (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Presidente Antônio Carlos, Ipatinga, 2016.
- SANTOS, A. D.; COSTA, G. D. S.; PERALTA-ZAMORA, P. Fenton remediation of contaminated soils: a critical review. *Química Nova*, v. 40, n. 3, p. 327-333, 2017.
- SILVA, C. M.; FONSECA, F. V.; CAMPOS, J. C.; COELHO, D. R. B.; WESCHENFELDER, S. E. Tratamento de água de produção de petróleo por processo H₂O₂/UV visando redução de incrustações em membranas. *Engevista*, v. 20, n. 1, p. 121-138, 2018.
- SOUZA, F. S. Comissão de Serviços de Infraestrutura do Senado Federal. Saneamento Básico – Situação do País e Propostas de Soluções. Disponível em: <http://www.senado.leg.br/comissoes/ci/ap/AP20091130_FranciscodeAssisSalvianodeSousa.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2018.
- VIEIRA, S. M.; COSTA, T. B.; NAVES, F. L. Utilização de processo oxidativo avançado (foto-Fenton) no tratamento de efluente à base de gasolina comercial. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, v. 4, n. 1, p. 0014-0018, 2018.