

Processo UV/H₂O₂ aplicado como pós-tratamento de águas residuárias da indústria de papel e celulose.

UV/H₂O₂ process applied as post-treatment of wastewater from paper and cellulose industry.

- **Data de entrada:**
26/01/2017
- **Data de aprovação:**
23/03/2017

Cristiane Lisboa Giroletti/ Jean Carlo Salomé dos Santos Menezes/ Flávio Rubens Lapolli/ Maria Angeles Lobo-Recio/ Maria Eliza Nagel-Hassemer*

DOI: 10.4322/dae.2017.018

Resumo

Desafios econômicos e ecológicos procedentes da crise hídrica e das restrições impostas pela legislação ambiental contribuíram recentemente para a expansão das aplicações dos processos oxidativos avançados como técnicas alternativas de tratamento de efluentes. O presente trabalho objetivou avaliar o processo UV/H₂O₂ aplicado como pós-tratamento de águas residuárias da indústria de papel e celulose, sob diferentes concentrações de oxidante. Os resultados revelaram o potencial da aplicação do processo UV/H₂O₂ na oxidação de substâncias orgânicas com remoção da DBO₅ de 85 a 92%. A remoção da cor foi total para todas as concentrações de H₂O₂. Para a turbidez, os índices de remoção variaram entre 41 e 83%. Na remoção dos compostos aromáticos, o processo reduziu em até 98% a aromaticidade do efluente, mostrando assim a efetividade do processo no tratamento dos efluentes da indústria de papel e celulose.

Palavras-chave: Processo oxidativo avançado. Radiação UV. Efluente Industrial. Papel e celulose.

Abstract

Economic and ecological challenges coming from the water crisis and the restrictions imposed by environmental legislation contributed to the expansion of applications of advanced oxidative processes as advanced treatment of effluents. The present study aimed to evaluate the UV/H₂O₂ process applied as post-treatment of wastewater from paper and cellulose industry under different concentrations of oxidant. The results revealed the potential of UV/H₂O₂ process application in oxidation of organic substances with removal of 85 and 92% of the BOD₅. Color removal was total for all concentrations of H₂O₂. For turbidity, removal values varied between 41 and 83%. The process reduced the aromatization of the effluent by up to 98%, thus demonstrating an effluent treatment process in the pulp and paper industry.

Keywords: Advanced oxidation process. UV radiation. Industrial effluent. Pulp and paper

Cristiane Lisboa Giroletti – Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Jean Carlo Salomé dos Santos Menezes – Doutor em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Biotecnologia da Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC).

Flávio Rubens Lapolli – Doutor em Hidráulica e Saneamento. Professor Titular do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC. Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq.

Maria Angeles Lobo-Recio – Doutora em Química. Professora Adjunta do Curso de Engenharia de Energia da UFSC, Campus de Araranguá.

Maria Eliza Nagel-Hassemer – Doutora em Engenharia Ambiental. Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC.

*Endereço para correspondência: Rua Afonso Marchioro 250, bairro Alvorada, CEP 89560-000.Videira - SC. E-mail cristiane.lisboa@posgrad.ufsc.br.

1 INTRODUÇÃO

Do ponto de vista econômico, a relevância das indústrias é incontestável. Entretanto, muitas vezes as mesmas são responsáveis por degradação ambiental, principalmente quando não possuem sistemas adequados e eficientes no gerenciamento de seus resíduos. Como qualquer segmento que emprega recursos naturais, as indústrias de papel e celulose também podem apresentar problemas de ordem ambiental.

Adjuntas às indústrias química e metalúrgica, as indústrias de papel e celulose constituem um grupo classificado como as três maiores fontes produtoras de águas residuárias (SAVANT et al., 2006; INCE et al., 2011). Essa classificação caracteriza os ramos de atividades como potencialmente causadoras de degradação ambiental, sendo que para as indústrias de papel e celulose o principal agravante é a geração de efluentes oriundos do grande volume de água consumido no processo produtivo. Geralmente, a disposição dos efluentes líquidos ocorre em corpos hídricos. Quando não recebem tratamento adequado, tendem a comprometer a qualidade das águas do corpo receptor (KAMALI e KHODAPARAST, 2015).

Tipicamente, as indústrias de papel e celulose utilizam processos convencionais em suas estações de tratamento de efluentes, como os processos biológicos e físico-químicos. Todavia, esses processos possuem suas limitações e quase sempre necessitam de outras técnicas aplicadas como pós-tratamento, e justamente são essas limitações que alavancam o desenvolvimento de novos estudos na busca de métodos mais eficientes para o tratamento de efluentes (COVINICH et al., 2014).

Considerando as características das indústrias de papel e celulose no que tange o consumo de água, a geração de efluentes líquidos e a atual crise nos recursos hídricos, evidencia-se a necessidade de desenvolvimento e aplicação de tecnologias e alternativas eficientes para melhoria da qualidade final desses efluentes.

Os processos oxidativos avançados (POA) surgiram nas últimas décadas como fonte promissora para tratamento de efluentes, principalmente porque são processos capazes de degradar vários compostos poluentes em curto espaço de tempo, promovendo a alteração da estrutura química de compostos recalcitrantes, tornando-os menos tóxicos e reduzindo sua massa molar (GOGATE e PANDIT, 2004; RUAS et al., 2012; WANG e XU, 2012; ARAÚJO et al., 2016).

O processo foto-oxidativo UV/H₂O₂ é um dos POA mais antigos, e consiste na combinação do peróxido de hidrogênio (H₂O₂) com radiação ultravioleta (UV). Seu uso tem sido relatado em diversas pesquisas, apresentando bons resultados na remoção de poluentes presentes em águas residuárias (NOGUEIRA, 2010). Esse processo é caracterizado pela clivagem homolítica de uma molécula de H₂O₂, via ação da radiação UV com formação de dois •OH, conforme a equação 1.



A absorção de fótons UV pelo H₂O₂ o faz dissociar-se em radicais hidroxila, os quais reagem rapidamente e não seletivamente com a maioria dos compostos orgânicos (LEGRINI et al., 1993; LOPEZ et al., 2003; MARTÍNEZ-HUITLE e BRILLAS, 2009; DE LA CRUZ et al., 2012).

O processo UV/H₂O₂ é relativamente de fácil manuseio e ao mesmo tempo resulta em significativa remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos, por isso sua aplicação tem sido frequentemente estudada (KIM e TANAKA, 2009; YUAN et al., 2011).

Para obter-se um bom desempenho dos POA, como por exemplo, da combinação UV/H₂O₂, alguns fatores operacionais devem ser monitorados, conforme descreve Gogate e Pandit, (2004). O pH do efluente é uma variável que deve ser controlada; valores na faixa de 2,5 e 3,5 são usualmente preferidos para combinação da técnica de fotólise UV acoplada com

peróxido de hidrogênio. A determinação da concentração de H_2O_2 também interfere na eficiência do processo, o valor exato é dependente da proporção do contaminante que pretende-se remover (NOGUEIRA, 2010; TAREK et al., 2011).

Comparado a outros POA, tais como H_2O_2/Fe^{2+} , UV/ O_3 , UV/ TiO_2 , o processo UV/ H_2O_2 apresenta algumas vantagens, como a miscibilidade completa do H_2O_2 em água, mineralização de compostos orgânicos, descoloração de águas residuárias, ausência de problemas de transferência de fase e disponibilidade comercial do H_2O_2 (AHMED et al., 2009).

Aplicados ao tratamento de efluentes de indústria de papel e celulose, os POA podem representar uma excelente opção, melhorando as características dos efluentes tanto para simples lançamento ao meio ambiente como para fins de reúso. Nesse contexto, o presente estudo buscou avaliar o processo UV/ H_2O_2 aplicado como pós- tratamento de águas residuárias de uma indústria de papel e celulose, empregando diferentes concentrações do oxidante.

2 OBJETIVO

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Reúso de Águas (LaRA) pertencente ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e no Laboratório Experimental de Monitoramento Ambiental I (LEMA), pertencente ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC). As amostras do efluente foram coletadas na saída do decantador da ETE de uma indústria de papel e celulose, localizada no meio oeste do Estado. As águas residuárias geradas na indústria são provenientes das etapas produtivas da pasta de celulose e da produção de sacos de papel multifoliados e embalagens, exceto da etapa da polpatação responsável pela geração do licor negro.

Os experimentos foram executados em um reator fotoquímico com volume útil de 1300 mL, com parede de vidro dupla e um mecanismo de recirculação de água de resfriamento que manteve a temperatura no interior do reator a $20 \pm 1^\circ C$. A irradiação foi feita utilizando uma lâmpada de média pressão de mercúrio, de 125 W, que foi inserida em um tubo de quartzo dentro do reator fotoquímico. A homogeneidade constante do efluente foi mantida com o auxílio de uma barra magnética e um agitador. O monitoramento das reações e a coleta das amostras foram realizadas por duas aberturas laterais do reator. A representação esquemática do sistema de oxidação fotoquímica é apresentada na Figura 1.

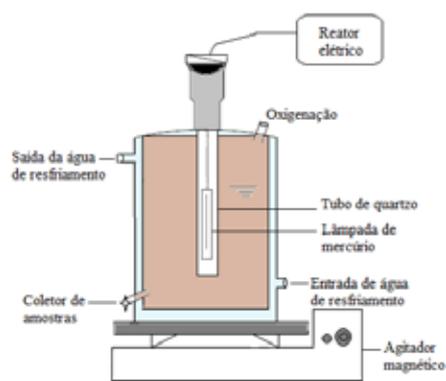


Figura 1 - Esquema do reator fotoquímico.

O tempo de detenção no reator fotoquímico foi de 120 minutos, e o tratamento foi realizado de modo batelada. Nos intervalos de tempo de 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos, cerca de 30 mL de amostra eram retirados para determinação da cor, turbidez, compostos aromáticos e DBO_5 . Os ensaios foram feitos em triplicada.

Foram testadas 6 diferentes concentrações de H_2O_2 (15, 30, 45, 100, 150 e 200 $mg.L^{-1}$ da Dinâmica, com peso molecular de 34%).

Comparadas a outros estudos, Silva (2007); Ahmed et al., (2009); Ruas et al., (2012), as concentrações de H_2O_2 aplicadas são relativamente

baixas. Essas foram selecionadas considerando alguns fatores julgados relevantes: o efluente em questão havia passado por um tratamento biológico; altas concentrações de H_2O_2 tendem a consumir os recém-gerados radicais $\bullet OH$ diminuindo a oxidação e a eficiência do processo, (CATALKAYA e KARGI, 2007; GENENA, 2009; NOGUEIRA, 2010).

O pH do efluente foi ajustado para 2,5 com solução a 10% de H_2SO_4 . Condições de pH em meio ácido favorecem a produção de radicais $\bullet OH$ e aumentam seu potencial de redução. Em meio ácido o potencial de redução do radical $\bullet OH$ é igual a 2,8 V, e em pH de meio alcalino é de 1,9 V (DOMENECH et al., 2001; KUMAR et al., 2011). A faixa de pH entre 2,5 e 3,5 é usualmente preferida para o processo UV/ H_2O_2 por apresentar maior eficiência na degradação de vários compostos (GOGATE e PANDIT, 2004; CAVALCANTE, 2005; SILVA, 2007; GENENA, 2009; NOGUEIRA, 2010; TAREK et al., 2011).

2.1 Monitoramento Analítico

Os métodos analíticos foram empregados de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005).

A cor foi avaliada espectrofotometricamente no comprimento de onda de maior absorção do efluente (440 nm), utilizando espectrofotômetro Hach modelo DR/2500.

A turbidez foi determinada pelo método Nefelométrico em turbidímetro Hach 2100N.

Os compostos aromáticos foram avaliados espectrofotometricamente por meio da leitura da absorbância em 280 nm, utilizando uma cubeta de quartzo de 1 cm de caminho óptico.

A DBO_5 foi monitorada pelo método da incubação por cinco dias a $20^\circ C$, sob agitação em medidor de DBO Hach Trak II.

Fluxo radiante da lâmpada UV: medida por Fotômetro Digital modelo MRUR- 202, conforme metodologia descrita por Nagel-Hassemer, (2006). A lâmpada testada foi inserida em um tubo de vidro sem fundo fixado num suporte de metal. Considerando as dimensões do reator e a relação ao diâmetro interno, o fotômetro foi colocado abaixo do tubo a uma distância de 12 cm da lâmpada. Após 5 minutos de a lâmpada ser ligada, foram feitas as leituras. A Figura 2 apresenta o sistema de medição da radiação da lâmpada.

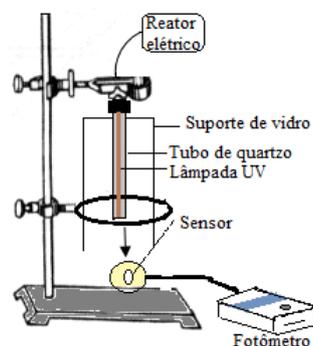


Figura 2 - Sistema de medição da radiação emitida pela lâmpada UV.

Para avaliar as possíveis diferenças entre as formas de tratamento, foram empregadas análises estatísticas de variância Anova (software Statistic 8) e o teste Tukey, com nível de significância α 0,05.

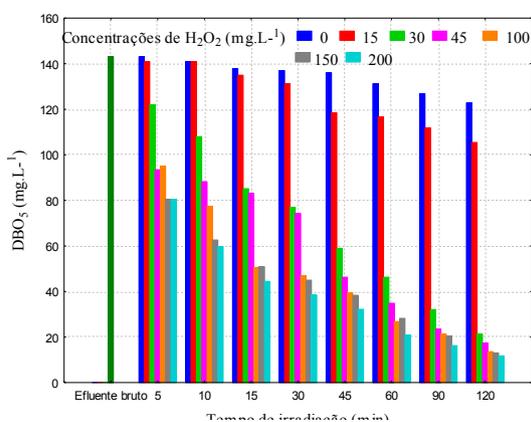
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As leituras de radiação emitida pela lâmpada indicaram valores em torno de $0,14 \text{ mW.cm}^{-2}$. Os resultados das análises físico-químicas e biológicas do efluente são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1- Caracterização dos efluentes da indústria de papel e celulose.

Parâmetro	Ef. Bruto	Ef. Pós- Biológico
Cor (PtCo)	278	136
Compostos Aromáticos (280 nm)	1,087	0,799
DBO ₅ (mg.L ⁻¹)	345	142,87
Turbidez (NTU)	4,20	1,62

A caracterização do efluente revelou que o processo de tratamento biológico da indústria vem removendo 60% da carga orgânica presente no efluente, ou seja, o mínimo exigido pela legislação em vigor disposta na Resolução Conama nº 430/2011, portanto um pós-tratamento seria indicado para melhorar esses resultados. A Figura 3 apresenta a remoção da DBO₅ após o tratamento foto-oxidativo.

**Figura 3 -** DBO₅ para as diferentes concentrações de H₂O₂ aplicadas em função do tempo de irradiação.

O emprego somente da radiação UV não favoreceu o processo de remoção da DBO₅. Aos 120 minutos de irradiação, a remoção limitou-se a 14%. A adição de H₂O₂ promoveu maior remoção. Com 15 mg.L⁻¹ de H₂O₂, a remoção foi de 26% aos 120 minutos de irradiação. Nesse mesmo tempo, a aplicação 30 e 45 mg.L⁻¹ de H₂O₂ resultou em 85% de remoção da DBO₅.

Os maiores índices de remoção foram constatados a partir da aplicação das concentrações mais altas de H₂O₂. Com 100, 150 e 200 mg.L⁻¹ obteve-se 92 % de remoção da DBO₅.

Esses resultados indicam que as concentrações de H₂O₂ aplicadas não foram excessivas, uma vez que o tratamento foto-oxidativo apresentou índices satisfatórios na oxidação de substâncias orgânicas. Quando há excesso de H₂O₂ no processo, o oxidante reage como agente inibidor da produção de radicais •OH comprometendo a taxa de remoção de compostos orgânicos (BADAWY et al., 2006).

A Tabela 2 apresenta os resultados estatísticos do teste de comparação múltipla de Tukey para a DBO₅.

Tabela 2- Resultados do teste de Tukey para a DBO₅.

H ₂ O ₂	Média	Grupo
200	46,64	a
150	48,96	a
100	56,27	a
45	64,40	a
30	70,16	a
15	107,18	b
0	142,92	c

O teste de Tukey mostrou que somente a concentração de 15 mg.L⁻¹ de H₂O₂ e a aplicação somente da radiação UV foram diferentes e inferiores entre as respostas médias das 6 concentrações aplicadas.

A cor dos efluentes das indústrias de papel e celulose varia entre 264 a 1623 PtCo (TIKU et al., 2007). A legislação ambiental vigente no Brasil não dispõe de um valor fixo para o parâmetro cor no lançamento de efluentes líquidos, entretanto a Resolução Conama nº 357/2005, complementada pela 430/2011, dispõe do valor máximo de cor verdadeira de até 75 mg Pt.L⁻¹ para lançamento de efluentes em corpos hídricos classificados como água doce classe II e III. O lançamento de efluentes coloridos pode provocar a formação de produtos tóxicos e comprometer a produtividade aquática (DEGHANI et al., 2016). A lignina é a principal substância responsável pela coloração dos efluentes da indústria de papel e celulose (RODRIGUES, 2011). Na Figura 4 é apresentada a evolução da remoção da cor do efluente em função do tempo de irradiação e das concentrações de H₂O₂.

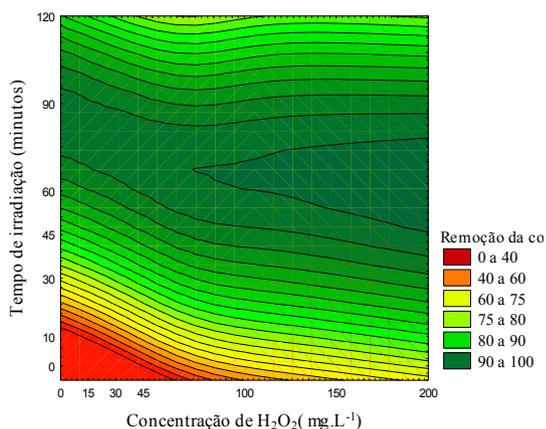


Figura 4 - Superfície de contorno para variável-resposta de remoção da cor (440 nm) em função do tempo de irradiação e das concentrações de H_2O_2 .

As eficiências de descoloração mais significativas foram observadas com a aplicação das concentrações de 150 e 200 $mg.L^{-1}$ de H_2O_2 , nas quais prevaleceram índices de remoções de 80 a 100%. A concentração de 100 $mg.L^{-1}$ de H_2O_2 também apresentou resultados satisfatórios com remoção inicial de 60% e de 100% a partir dos 60 minutos de irradiação. Nagel-Hassemmer et al., (2012) reportaram índices de 96% de remoção da cor de efluente têxtil com aplicação do processo UV/ H_2O_2 na concentração de 200 $mg.L^{-1}$ de H_2O_2 após 60 minutos de irradiação. O mesmo trabalho concluiu que concentrações superiores a 200 ou 250 $mg.L^{-1}$ de H_2O_2 não melhoram os índices de remoção e correspondem a um consumo em excesso do oxidante.

A aplicação das menores concentrações de H_2O_2 demandou maior tempo de irradiação para a obtenção de resultados satisfatórios na remoção da cor do efluente. A partir dos 30 minutos de irradiação, com 15, 30 e 45 $mg.L^{-1}$ obtiveram-se remoções na ordem de 60, 75% e 80% respectivamente.

A adição de H_2O_2 em sistemas de tratamento UV, mesmo que em baixas concentrações, favorece a remoção da cor (CATALKAYA e KARGI, 2007; HERMOSILLA et al., 2014). A influência da concentra-

ção de H_2O_2 para remoção da cor é justificada, ao passo que em baixas concentrações desse oxidante a quantidade de radicais $\bullet OH$ gerados pela radiação UV não é totalmente suficiente para descolorir, degradar, ou mineralizar orgânicos contidos nos efluentes (AHMED et al., 2009).

Ao oposto do reportado por Wang et al., (2004), neste estudo a aplicação da radiação UV de forma isolada apresentou remoção significativa da cor. Contudo, foi necessário um tempo maior de exposição da amostra para que a cor fosse removida. Nos intervalos de tempo de 90 e 120 minutos de irradiação sem a adição de H_2O_2 , a remoção foi de 90%. A partir de 60 minutos, todas as concentrações mostraram-se efetivas, removendo em média de 92 a 98% da cor presente nas amostras. Esses resultados indicam um favorecimento do processo UV/ H_2O_2 na degradação de macromoléculas cromóforas presentes no efluente. A Tabela 3 apresenta a comparação de múltiplas médias obtidas entre as 6 concentrações de H_2O_2 .

Tabela 3 - Resultados do teste de Tukey para a cor.

H_2O_2	Média	Grupo
200	25,29	a
150	29,83	a
100	40,86	b
45	41,66	b
30	42,46	b
15	43,15	b
0	43,30	b

O teste de Tukey para cor revelou que as concentrações de 200 e 150 $mg.L^{-1}$ de H_2O_2 foram superiores às demais concentrações testadas.

Para a turbidez, a caracterização do efluente revelou valores relativamente baixos, em torno de 1,62 NTU. A Figura 5 apresenta o comportamento da turbidez durante os 120 minutos de aplicação do processo foto-oxidativo.

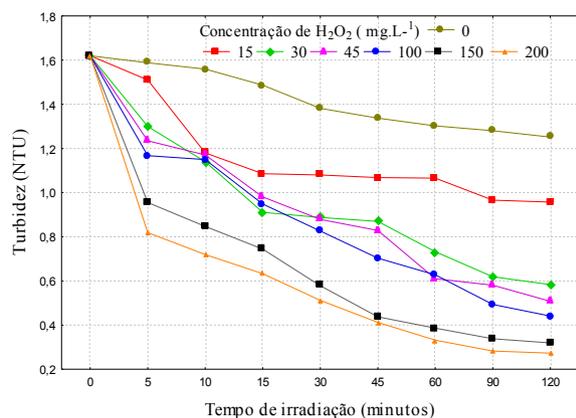


Figura 5 - Evolução da turbidez em função do tempo de irradiação e da concentração de H₂O₂.

Todas as concentrações de H₂O₂ promoveram remoção da turbidez. As aplicações de 150 e 200 mg.L⁻¹ removeram em média 83% da turbidez. Nagel-Hassemmer et al., (2012) relatam remoção de 18 a 23% em 45 e 60 minutos de irradiação utilizando 250 mg.L⁻¹ de H₂O₂. Um aumento na turbidez foi observado com a aplicação de 350 e 500 mg.L⁻¹ de H₂O₂.

Com 30, 45 e 100 mg.L⁻¹ de H₂O₂, a remoção média foi de 64, 69 e 73%, respectivamente. Com a concentração de 15 mg.L⁻¹, a remoção da turbidez foi de 41%. O emprego da radiação UV não favoreceu consideravelmente a remoção da turbidez, pois ao final dos 120 minutos de irradiação a remoção média foi de somente 23%. O teste de Tukey, apresentado na Tabela 4, revelou que a concentração de 200 mg.L⁻¹ de H₂O₂ foi superior, para a remoção da turbidez enquanto as demais concentrações apresentaram médias de respostas inferiores.

Tabela 4 - Resultados do teste de Tukey para a turbidez.

H ₂ O ₂	Média	Grupo
200	0,27	a
150	0,31	b
100	0,43	c
45	0,49	d
30	0,58	e
15	0,95	f
0	1,25	g

A ausência de altos valores de absorvância na região UV 280 nm, indicam uma taxa de remoção dos compostos aromáticos no efluente tratado biologicamente (ZANELLA et al., 2010; NAGEL-HASSEMER et al., 2012). O processo UV/H₂O₂ aplicado como pós-tratamento biológico intensificou a remoção desses compostos. A Figura 6 apresenta a evolução da absorvância em função das concentrações de H₂O₂ e tempo de irradiação.

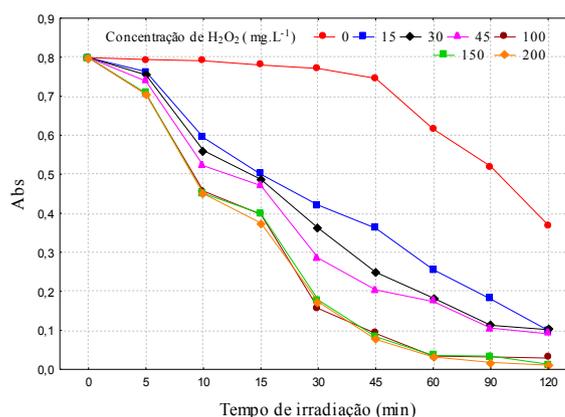


Figura 6 - Evolução da absorvância (280 nm) em função do tempo de irradiação e concentrações de H₂O₂.

A remoção da aromaticidade durante o processo foto-oxidativo foi progressiva em todas as concentrações de H₂O₂ aplicadas. Os índices de remoção variam entre 87 a 98%. O uso somente da radiação UV também reduziu a absorvância, contudo o processo limitou-se a um valor máximo de 64% aos 120 minutos de irradiação. Os resultados obtidos indicam que o processo modificou a estrutura dos compostos aromáticos, transformando-os em moléculas menores. A Tabela 5 apresenta os resultados do teste de Tukey dos compostos aromáticos.

Tabela 5 - Resultados do teste de Tukey para compostos aromáticos.

H ₂ O ₂	Média	Grupo
200	0,011	a
150	0,013	a
100	0,028	a
45	0,070	a
30	0,091	a
15	0,104	a
0	0,286	b

Estatisticamente, nenhuma das concentrações de H_2O_2 testadas foi superior ou diferente significativamente. O emprego da radiação UV de forma isolada foi inferior aos demais tratamentos.

4 CONCLUSÃO

A avaliação dos resultados obtidos no estudo do processo UV/ H_2O_2 aplicado no tratamento de efluentes da indústria de papel e celulose permite as seguintes conclusões:

A cor diminuiu progressivamente ao longo do tempo de tratamento. O aumento das concentrações de H_2O_2 conduziu a maiores remoções da cor. Aos 5 minutos de tratamento, o efluente apresentou valores de cor inferior a 75 PtCo, atendendo aos requisitos impostos pela legislação para lançamento em águas doce classe II. Aos 120 minutos de irradiação, as concentrações testadas apresentaram índices de remoção entre 71 e 100%.

O processo UV/ H_2O_2 mostrou-se efetivo na oxidação de substâncias orgânicas presentes no efluente, apresentando remoção da DBO_5 em até 91% com a aplicação das concentrações de 150 e 200 $mg.L^{-1}$ de H_2O_2 . Na remoção dos compostos aromáticos, houve índices de remoção de até 98%.

Na remoção da turbidez, os melhores resultados variaram em função das maiores concentrações de H_2O_2 , com 150 e 200 $mg.L^{-1}$ a remoção foi de 83%.

A aplicação da radiação UV de forma isolada foi efetiva na remoção da cor, atingindo remoções na ordem de 90% ao final do tratamento foto-oxidativo. Contudo, não foram alcançados resultados satisfatórios para a DBO_5 , obtendo-se remoção de 14%. Para os compostos aromáticos, a remoção máxima foi limitada em 64%, e para a turbidez, em 23% aos 120 minutos de irradiação.

Considerando os índices de remoção baseados nas análises estatísticas, dentre as 6 concentrações de H_2O_2 avaliadas, as que apresentaram me-

lhores resultados para as variáveis monitoradas foram 150 e 200 $mg.L^{-1}$ H_2O_2 .

5 AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Reuso de Águas (LaRA) do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC, e ao Laboratório de Monitoramento Ambiental da UNOESC pela disponibilização de infraestrutura para realização dos ensaios. À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- AHMED, B.; MOHAMED, H.; LIMEM, E.; NASR, B. Degradation and mineralization of organic pollutants contained in actual pulp and paper mill wastewaters by a UV/ H_2O_2 process. **Industrial e Engineering Chemistry Research**. v 48, p. 3370-3379, 2009.
- APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Washington: APHA, AWWA, WEF. 20. ed., 2005.
- ARAÚJO, K.S.; ANTONELLI, R.; GAYDECZKA, B.; GRANATO, A.P.; MALPASS, G. R.P. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. **Revista Ambiente e Água**; p. 387-401, 2016.
- BADAWY, M.I.; GHALY, M.Y.; GASD-ALLAHA T.A. Advanced oxidation processes for the removal of organo-phosphorus pesticides from wastewater, **Desalination**. v 194 p. 166-175, 2006.
- CATALKAYA, E.C.; KARGI, F. TOC and AOX removals from pulp mill effluent by advanced oxidation processes: A comparative study. **Journal of Hazardous Materials**. B 139. p. 244-253, 2007.
- CAVALCANTE, A.M. **Técnicas Oxidativas para a Remoção do Teor de Matéria Orgânica de uma Corrente de Soda Exausta de Refinaria de Petróleo**. 2005. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - COPPE, Rio de Janeiro.
- BRASIL. Ministério Do Meio Ambiente, Conselho Nacional De Meio Ambiente. **Resolução Conama nº 357, de 17 de março de 2005 – In: Resoluções, 2005**.
- BRASIL. Ministério Do Meio Ambiente, Conselho Nacional De Meio Ambiente. **Resolução Conama nº 430, de 13 de maio de 2011 – In: Resoluções, 2011**.
- COVINICH, L. G.; BENGOCHEA, D.I.; FENOGLIO, R. J.; AREAL, M. C; Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment in the Pulp and Paper Industry: A Review. **American Journal of Environmental Engineering**, p. 56-70. 2014.

- DEHGHANI, M. H.; KARIMIA, B.; RAJAEIC, M.S. The effect of aeration on advanced coagulation, flotation and advanced oxidation processes for color removal from wastewater. **Journal of Molecular Liquids**, v 223, p. 75-80, 2016.
- DE LA CRUZ, N. et al. Degradation of 32 emergent contaminants by UV and neutral photo-fenton in domestic wastewater effluent previously treated by activated sludge. **Water Research**, v 46, p. 947- 957, 2012.
- DOMENECH, X.; JARDIM, W.; LITTER, M. Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes. In: **BLESA, M. Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea**. La Plata, p.3-26, 2001.
- GENENA, A.K. **Tratamento de efluente agroindustrial contendo compostos persistentes por meio dos processos de coagulação-floculação, fenton, foto-fenton, fotoperoxidação e ozonização**. 2009. 139 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- GOGATE, P.R.; PANDIT, A.B. A Review of Imperative Technologies for Wastewater Treatment I: Oxidation Technologies at Ambient Conditions. **Advances in Environmental Research**, v 8, p. 501-551, 2004.
- HERMOSILLA, D. MERAYO, N. CASCÓ, A. BLANCO, Á. The application of advanced oxidation technologies to the treatment of effluents from the pulp and paper industry: a review. **Environment Science Pollut Research**. 2014.
- INCE, B.; CETECIOGLU, Z.; INCE, O. **Environmental Management in Practice. Pollution Prevention in the Pulp and Paper**. Capítulo 11- Volume editado por Elzbieta Broniewicz. 2011.
- KAMALI, M.; KHODAPARAST, Z. Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v 114, p. 326-342, 2015.
- KIM, I., TANAKA, H. Photodegradation characteristics of PPCPs in water with UV treatment. **Environment International**, v 35 (5), p.793-802, 2009.
- KUMAR, B.N.; ANJANEYULU, Y.; HIMABINDU, V. Comparative studies of degradation of dye intermediate (H-acid) using TiO₂/UV/H₂O₂ and Photo-Fenton process B. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research**, v 3(2), p.718-731, 2011.
- LEGRINI, O.; OLIVEROS, E.; BRAUN, A. M. Photochemical Processes for Water Treatment. **Chemical Reviews**, v 93, 671-698, 1993.
- LOPEZ, A.; BOZZI, A.; MASCOLO, G.; KIWI, J. Kinetic investigation on UV and UV/H₂O₂ degradations of pharmaceutical intermediates in aqueous solution. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry** v156, p.121-126, 2003.
- MARTÍNEZ-HUITLÉ, C.A.; BRILLAS, E. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods: A general review. **Applied Catalysis B: Environmental**, v.87, p.105-145, 2009.
- NAGEL-HASSEMER, M.E.; CORAL, L.A.; LAPOLLI, F.R.; AMORIM, M.T.S.P. Processo UV/H₂O₂ como pós-tratamento para remoção de cor e polimento final em efluentes têxteis. **Química Nova**, v 35, p. 900-904, 2012.
- NAGEL-HASSEMER, M.E. **Oxidação fotoquímica UV/H₂O₂ para degradação de poluentes em efluentes da indústria têxtil**. 2006. 175f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- NOGUEIRA, M.R.C.; **Tratamento de efluentes líquidos através de adsorção e oxidação catalítica utilizando**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 85p. 2010.
- RODRIGUES, C. L. S. Mecanismos de remoção de compostos orgânicos no sistema de lodos ativados de uma fábrica de polpa Kraft branqueada de eucalipto. 2011. 87 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais
- RUAS, D.B; CHAPARRO, T.R; PIRES, E.C. Advanced oxidation process H₂O₂/UV combined with anaerobic digestion to remove chlorinated organics from bleached kraft pulp mill Wastewater. **Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia**. n° 63 , 2012.
- SAVANT, D.V.; ABDUL-RAHMAN, R. L.; RANADE, D. R. Anaerobic degradation of adsorbable organic halides (AOX) from pulp and paper industry. **Bioresource Technology**, p.92-114, 2006.
- SILVA, T.C.F. **Processos oxidativos avançados para tratamento de efluentes de indústria de celulose Kraft branqueada**. 2007. 104 f. Dissertação (Mestrado em Agroquímica) - Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais.
- TAREKS, J.; MONTASERY, G.; IBRAHIM E. E.S.; EGLAL R. S.; RABAB A. N. A comparative study among different photochemical oxidation processes to enhance the biodegradability of paper mill Wastewater. **Journal of Hazardous Materials** v 185, p. 353-358, 2011.
- TIKU, K. D.; KUMAR, A. S.; SAWHNEY, A.S.; SINGH, V. P.; KUMAR, R. Effectiveness of Treatment Technologies for Wastewater Pollution Generated by Indian Pulp Mills. **Environmental Monitoring and Assessment**, v 132, p- 453-466, 2007.
- WANG, J.L.; XU, L.J. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Formation of Hydroxyl Radical and Application. **Environmental Science and Technology**, v 42, p.251-325, 2012.
- WANG, A.; QU, J.; LIU, H.; GE, J. Degradation of azo dye Acid Red 14 aqueous solution by electrokinetic and electrooxidation process. **Chemosphere**, v.55, p. 1189-1196, 2004.
- ZANELLA, G.; SCHARF, M.; PERALTA-ZAMORA, P. Tratamento de banhos de tingimento têxtil por processos foto-fenton e avaliação da potencialidade de reuso. **Química Nova**, v.33 n° 5, p. 1039-1043, 2010.
- YUAN, F.; HU, C.; HU, X.; WEI, D.; CHEN, Y.; QU, J. Photodegradation and toxicity changes of antibiotics in UV and UV/H₂O₂ process. **Journal of Hazardous Materials** v 185, p.