

# REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:  
Investigación, desarrollo y práctica.

## APLICAÇÃO DE PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS PARA TRATAMENTO DE EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

\*Kely Viviane de Souza<sup>1</sup>  
Bruna Menon<sup>1</sup>  
Jeanette Beber de Souza<sup>1</sup>  
Carlos Magno de Souza Vidal<sup>1</sup>

APPLICATION OF ADVANCED OXIDATION PROCESSES  
FOR WASTEWATER TREATMENT OF PULP AND  
PAPER INDUSTRY

Recibido el 27 de septiembre de 2016; Aceptado el 8 de junio de 2017

### Abstract

*The pulp and paper industries have a high potential for pollution due to high production of liquid effluent with high staining, organic loading, and deleterious compounds. Conventional approaches, such as biological treatment, are often not sufficient for degrading this type of effluent. Thus, identifying novel treatment alternatives, such as advanced oxidative processes, is necessary. The main aim of this work was to evaluate the efficiencies of the Fenton and photo-Fenton processes for the degradation of final effluent from the pulp and paper industry. For this, we conducted several tests in the dark as well as under natural and artificial irradiation, at pH 3, a volume of 250 mL, an Fe<sup>2+</sup> concentration of 15 mg/L<sup>-1</sup>, and a H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration of 200 mg/L<sup>-1</sup>. The best results were obtained from the experiments performed under artificial irradiation, in which the removal of COD, color, turbidity, and total phenols was 60, 99, 99, and 80%, respectively, after 240 min of treatment. The results demonstrated the efficiency of the photo-Fenton process, supporting its potential for post-treatment of this type of effluent.*

**Key Words:** Fenton, Phenolic compounds, Photo-Fenton, Wastewater pulp and paper.

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná (UNICENTRO), Brasil.

\*Autor correspondente: Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro-Oeste do Paraná (UNICENTRO), Campus de Irati - PR 153- Km 7- Riozinho- Irati/Pr. CEP 84500-000. Email: [kelyvdesouza@gmail.com](mailto:kelyvdesouza@gmail.com); [kelys@irati.unicentro.br](mailto:kelys@irati.unicentro.br)

## Resumo

As indústrias de papel e celulose apresentam um elevado potencial poluidor, em razão da grande geração de efluentes líquidos contendo elevada coloração, carga orgânica e compostos deletérios. Por muitas vezes, tratamentos convencionais, como os biológicos, não são suficientes para degradar este tipo de efluente, necessitando assim de novas alternativas de tratamento, como por exemplo, os Processos Oxidativos Avançados. O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar a eficiência dos processos Fenton e foto-Fenton na degradação do efluente final da indústria de papel e celulose. Para tanto, realizou-se ensaios na ausência de luz e sob radiação solar e artificial, nas condições de pH 3, volume: 250 mL, concentração de  $\text{Fe}^{2+}$ :  $15 \text{ mg.L}^{-1}$  e concentração de  $\text{H}_2\text{O}_2$ :  $200 \text{ mg.L}^{-1}$ . Obteve-se os melhores resultados nos ensaios sob radiação artificial, em que a remoção da DQO, cor, turbidez e fenóis totais foi de 60, 99, 99 e 80%, respectivamente após 240 minutos de tratamento. Os resultados demonstraram eficiência do processo foto-Fenton, indicando como um potencial pós-tratamento para este tipo de efluente.

**Palavras-chave:** Compostos fenólicos, Efluente de papel e celulose, Fenton, Foto-fenton.

---

## Introdução

Nas últimas décadas, vários fatores têm contribuído para a poluição do meio ambiente, tais como, crescimento populacional, urbanização mal planejada, além da expansão das atividades industriais e agrícolas. Estes eventos prejudiciais ao meio ambiente ocorrem, principalmente, devido à geração de resíduos domésticos, industriais e agrícolas, os quais quando tratados e dispostos de maneira inadequada, apresentam elevado potencial poluidor (Durigan *et al.*, 2012).

Com a evolução dos processos industriais e o surgimento de inúmeros produtos que se tornaram de suma necessidade, a atividade industrial adquiriu um caráter essencial na sociedade contemporânea. Sendo esta também responsabilizada por grande parte da contaminação ambiental existente, pois, os processos industriais, usualmente, utilizam grandes quantidades de água, gerando grande volume de efluente, o que pode contribuir com a contaminação dos recursos hídricos, em função da ausência de sistemas eficientes de tratamento (Merayo *et al.*, 2013). Sendo assim, a falta de tratamento adequado dos resíduos industriais despejados nos corpos d'água sem nenhum processo de remediação pode ser considerada uma das maiores e mais impactantes agressões aos corpos hídricos (Pereira e Freire, 2005). Dentro deste contexto, uma importante parcela do processo de contaminação pode ser atribuída às atividades das refinarias de petróleo, indústrias químicas, têxteis e papeleiras (Merayo *et al.*, 2013). As indústrias de papel e celulose ocupam a terceira posição no mundo, depois das indústrias de metais e químicas, em termos de retirada de água doce e uso intensivo desta (Thompson *et al.*, 2001).

O setor papeleiro é um dos segmentos industriais mais competitivos do Brasil, com padrão de qualidade equivalente aos melhores do mundo, atuação globalizada e extremamente ativa. Tem em seu processo produtivo, basicamente, madeira plantada, eucalipto e pinus, originária de reflorestamentos (CETESB, 2008). Historicamente, indústrias de papel e celulose têm sido consideradas grandes consumidoras de recursos naturais: madeira, água, combustível fóssil e

energia elétrica, além de contribuir em peso nas descargas de poluentes para o meio ambiente. A madeira, principal matéria-prima utilizada na indústria de papel e celulose, é composta por fibras de celulose, hidratos de carbono, tais como, amido e açúcares, bem como lignina, que funciona como uma substância adesiva para as fibras de celulose. Sucintamente, ela é decomposta com o objetivo de separar a celulose de substâncias não celulósicas, assim, é dissolvida quimicamente para formar uma polpa, a qual, na sequência é secada para produção do papel. Para garantir a qualidade do produto, são adicionados corantes, conservantes e materiais de revestimento durante o processo (Thompson *et al.*, 2001). Durante todo o processo, são gerados consideráveis quantidades de efluentes, aproximadamente 60m<sup>3</sup> por tonelada de polpa de celulose seca produzida (Ali e Sreekrishnan, 2001). A sua composição varia consideravelmente em função do tipo de produto elaborado, no entanto, são características comuns: elevados valores de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos (SS), toxicidade, turbidez e cor, comprometendo o ecossistema aquático e terrestre, quando tratado de forma inadequada (Pokhrel e Viraraghavan, 2004; Merayo *et al.*, 2013).

Dentre as substâncias que podem estar presentes no efluente, milhares de compostos químicos já foram identificados, incluindo compostos organoclorados, compostos fenólicos, metais pesados, ácidos e resinas (CETESB, 2008; Catalkaya e Kargi, 2007). Devido à presença desses e de outros compostos tóxicos, o tratamento destes efluentes deve ser estudado com bastante atenção.

Dentre os processos de tratamento mais utilizados para a degradação de poluentes orgânicos, encontram-se os biológicos. No entanto, sua eficiência pode ficar comprometida, uma vez que muitos compostos não são efetivamente degradados pelos microrganismos, como por exemplo, organoclorados, nitroaromáticos e compostos fenólicos (Pereira e Freire, 2005; Tambosi, 2005).

Por esta razão, novas tendências estão focadas na incorporação de tipos alternativos de tratamento, como os processos oxidativos avançados (POA), que podem ser capazes de remover compostos recalcitrantes (Merayo *et al.*, 2013). Os POA são baseados na geração de radicais hidroxila ( $\cdot\text{OH}$ ), um oxidante com alto potencial redutor (2.8 V), o qual, em quantidade suficiente pode mineralizar compostos orgânicos em dióxido de carbono, água e íons inorgânicos (Teixeira e Jardim, 2004).

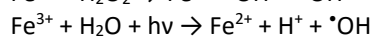
O radical hidroxila é geralmente formado em reações que resultam da combinação de oxidantes, como ozônio e peróxido de hidrogênio, e de catalisadores, como íons metálicos ou semicondutores, que podem ocorrer com ou sem irradiação ultravioleta (UV) ou visível (Vis) (Nogueira *et al.*, 2007).

Dentre os vários tipos de POA, o processo Fenton se destaca pela simplicidade operacional, elevada eficiência na descoloração e por elevar a biodegradabilidade do efluente. Este consiste

na reação entre o catalisador íon  $Fe^{2+}$  e o oxidante  $H_2O_2$  para a formação de radicais hidroxila (Equação 1) (Lange *et al.*, 2006). O processo pode ser melhorado pela incorporação de radiação (ultravioleta ou visível), o que caracteriza o processo foto-Fenton (Equações 1-2) (Durigan *et al.*, 2012).



Equação (1)



Equação (2)

Um grande avanço é a utilização de luz solar como fonte de radiação no processo foto-Fenton, possibilitando grande redução nos custos com lâmpadas e energia.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho consiste na aplicação de processos oxidativos avançados do tipo Fenton e foto-Fenton na degradação de efluentes da indústria de papel e celulose.

## Materiais e métodos

### Efluentes

A amostra do efluente foi cedida por uma indústria de papel e celulose de grande porte. Sua respectiva Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) possui vazão de projeto de  $4000\text{ m}^3/\text{dia}$ , e recebe todos os efluentes líquidos produzidos durante o processo produtivo. O processo de polpação empregado nesta indústria é do tipo Kraft.

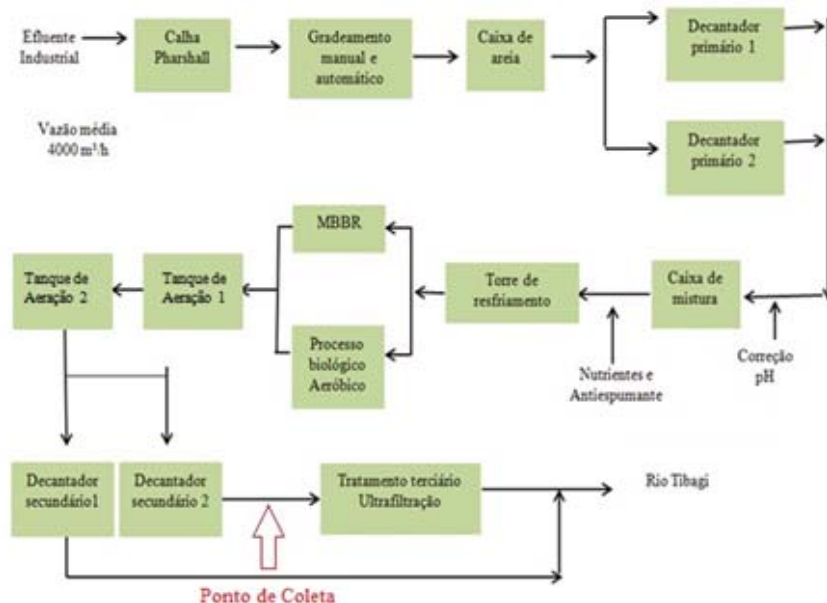


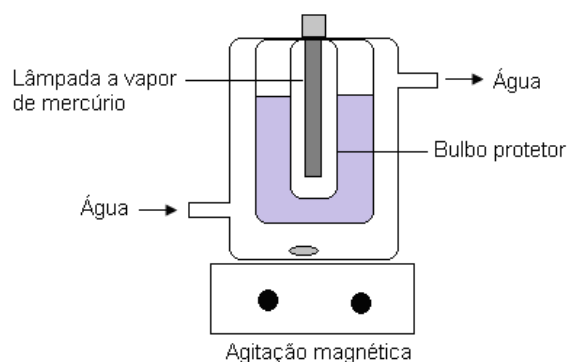
Figura 1. Fluxograma da ETE (Neves, 2014).

O ponto de coleta da amostra está representados na Figura 1. O efluente foi coletado após o decantador secundário, antes de ser lançado no rio, uma vez que o tratamento terciário (Ultrafiltração) não estava em funcionamento. Foram realizadas três coletas, durante os meses de julho, agosto e setembro e os valores de eficiência dos parâmetros estão expressos como valores médios.

### Procedimento

O processo Fenton foi realizado na ausência de luz em um béquer com agitação magnética contendo 250 mL de amostra, 15 mgL<sup>-1</sup> de Fe<sup>2+</sup> e 200 mgL<sup>-1</sup> de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Para o processo foto-Fenton com radiação artificial, os ensaios foram realizados em reator fotoquímico convencional de bancada, de borosilicato equipado com agitador magnético e refrigeração por água (Figura 2). A radiação foi proporcionada por uma lâmpada a vapor de mercúrio de 125 Watts, inserida na solução com um bulbo protetor de vidro.



**Figura 2.** Reator fotoquímico do processo foto-Fenton com radiação artificial.

Os ensaios utilizando luz solar foram realizados durante os meses de julho e setembro, na cidade de Irati/PR, Latitude: 25° 28' 02" S Longitude: 50° 39' 04" W, em dias ensolarados e com poucas nuvens, entre 11:00 e 15:00 horas. Para este estudo, foi utilizado um béquer equipado com agitação magnética e coletor solar parabólico revestido de alumínio, representado na Figura 3. A espessura da lâmina de efluente foi de 8 cm.

Para o processo foto Fenton com luz solar e artificial, foram utilizadas as mesmas condições empregadas no processo Fenton. Tanto para o sistema utilizando luz artificial quanto luz solar, a intensidade de radiação foi medida com o auxílio de um radiômetro modelo VLW-3-W, acoplado a uma sonda de comprimento de onda de 254 nm (para luz artificial) e de 365 nm (para a luz solar).



**Figura 3.** Reatores equipados com Coletor Solar parabólico revestido de alumínio.

### Controle Analítico

Os parâmetros avaliados em todos os processos de tratamento foram: Cor aparente, Turbidez, DQO e Fenóis totais, realizados de acordo com metodologia padrão Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1995). Todos os ensaios foram realizados em triplicata e calculado o desvio padrão para cada parâmetro.

A concentração de peróxido de hidrogênio residual foi determinada espectrometricamente, utilizando metodologia modificada a partir de procedimentos descritos na literatura por Oliveira (2001). Neste procedimento o peróxido de hidrogênio reage com o metavanadato de amônio propiciando a formação do cátion peroxovanádio, o qual absorve fortemente no comprimento de onda 446 nm.

## **Resultados e discussão**

### Caracterização do Efluente

O efluente foi previamente caracterizado segundo os parâmetros supracitados, cujos valores mínimo e máximo estão apresentados na Tabela 1. A cor pode ser caracterizada pela presença de substâncias dissolvidas ou em suspensão no efluente, a qual é variável conforme a quantidade e a natureza do material presente. Ressalva-se que a cor é sensível ao pH, tendo remoção mais fácil em pH baixo, enquanto em pH alto a cor se intensifica. Dentre os materiais passíveis de conferir cor à água, podemos citar os ácidos fúlvicos e húmicos resultantes da decomposição parcial de compostos orgânicos; efluentes sanitários e industriais contendo taninos (efluentes de curtumes); anilinas dos efluentes provenientes de indústrias têxteis e de pigmentos; e também compostos fenólicos que estão presentes em efluentes de indústrias papeleiras (Vasconcelos e Gomes,

2009). Dentro deste contexto, destaca-se a elevada concentração de fenóis totais, o que pode estar conferindo cor ao efluente.

**Tabela 1.** Valores mínimo e máximo dos parâmetros utilizados para a caracterização do efluente antes do tratamento por processos fotoquímicos.

Parâmetros	Efluente	
	Valor mínimo	Valor máximo
pH	7.0	7.0
Cor aparente (uC)	2190.3	2402.5
Turbidez (uT)	190.2	224.1
DQO (mgO <sub>2</sub> .L <sup>-1</sup> )	902.9	942.6
Fenóis totais (mg.L <sup>-1</sup> )	9.0	14.3

A cor pode ser caracterizada pela presença de substâncias dissolvidas ou em suspensão no efluente, a qual é variável conforme a quantidade e a natureza do material presente. Ressalva-se que a cor é sensível ao pH, tendo remoção mais fácil em pH baixo, enquanto em pH alto a cor se intensifica. Dentre os materiais passíveis de conferir cor à água, podemos citar os ácidos fúlvicos e húmicos resultantes da decomposição parcial de compostos orgânicos; efluentes sanitários e industriais contendo taninos (efluentes de curtumes); anilinas dos efluentes provenientes de indústrias têxteis e de pigmentos; e também compostos fenólicos que estão presentes em efluentes de indústrias papeleiras (Vasconcelos e Gomes, 2009). Dentro deste contexto, destaca-se a elevada concentração de fenóis totais, o que pode estar conferindo cor ao efluente.

A turbidez, por sua vez, se dá pela presença de partículas em suspensão, causada por uma gama de materiais que provocam dispersão e absorção da luz, dando aspecto turvo à água (Vasconcelos e Gomes, 2009).

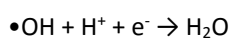
Em relação à DQO, esta pode ser entendida pela quantidade de oxigênio necessária para oxidação da matéria orgânica através de um agente químico. Sendo este um importante parâmetro para caracterização e estudos de efluentes industriais (Vasconcelos e Gomes, 2009).

Diante das características apresentadas pelo efluente, é notória a necessidade de um tratamento de polimento, de maneira a remover compostos recalcitrantes, ou seja, que são resistentes a processos convencionais de tratamento. Por isso o estudo dos processos avançados torna-se conveniente.

#### Processos fotoquímicos: Fenton e foto-Fenton

Vários fatores influenciam a degradação de um efluente nos processos Fenton e foto-Fenton, tais como: pH; concentração de íons ferrosos; concentração de peróxido de hidrogênio e a carga

orgânica presente. Dados da literatura mostram que existem algumas limitações referentes ao pH, sendo que a eficiência de degradação máxima ocorre entre os valores de pH de 2.5 a 3 (Nogueira *et al.*, 2007). Rabelo (2005), em seu estudo, encontrou como pH ótimo para tratamento de efluente final de uma indústria de celulose Kraft branqueada o valor igual a 3. Ressalta-se que valores de pH superiores a 4 prejudicam a degradação dos compostos presentes no efluente devido a precipitação do íon férrico na forma de hidróxidos e consequente diminuição da disponibilidade do reagente. Abaixo de pH 2.5 a velocidade de degradação também diminui apesar das espécies de ferro permanecerem solúveis, pois altas concentrações de H<sup>+</sup> podem sequestrar radicais hidroxila de acordo com a Equação 3 (Nogueira *et al.*, 2007).



**Equação (3)**

Em razão destes fatores, nos processos Fenton e foto-Fenton, o pH não representa uma variável passível de otimização, sendo fixado seu valor em 3.

Outro parâmetro que deve ser levado em consideração na aplicação do processo é a concentração de íons ferrosos. A Resolução do CONAMA nº 430 de 2011 que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluente, em seu artigo 16 restringe que a concentração máxima de ferro em efluentes não pode ultrapassar o limite de 15 mg.L<sup>-1</sup> ao ser lançado em corpos hídricos receptores. Com o intuito de cumprir os padrões impostas pela legislação, a concentração de íons ferrosos utilizada em todos os ensaios, foi de 15 mg.L<sup>-1</sup>.

Em relação à concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, segundo Nogueira (2007), quando o oxidante está em excesso, pode atuar como sequestrador de radical hidroxila, formando o radical hidroperoxila (HO<sub>2</sub>•), o qual apresenta menor potencial redutor comparado ao radical hidroxila, prejudicando a eficiência de degradação.

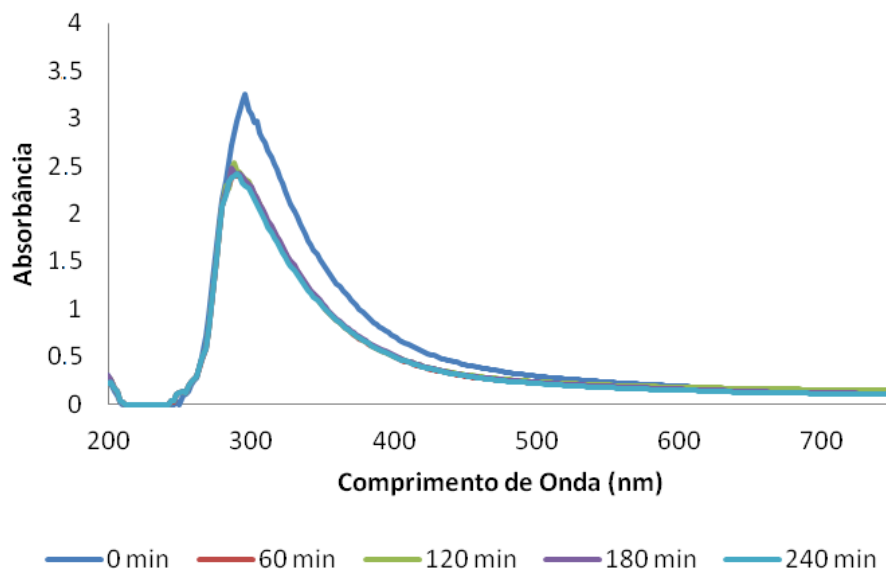
Para este estudo, foram fixados para todos os ensaios, volume de efluente de 250 mL; pH 3; [Fe<sup>2+</sup>] 15 mg.L<sup>-1</sup> e [H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>] 200 mg.L<sup>-1</sup>.

### **Processo Fenton**

Segundo Araújo (2009), o processo Fenton é tecnicamente viável como tratamento para efluente de indústria de papel e celulose, podendo apresentar elevada eficiência de remoção de cor.

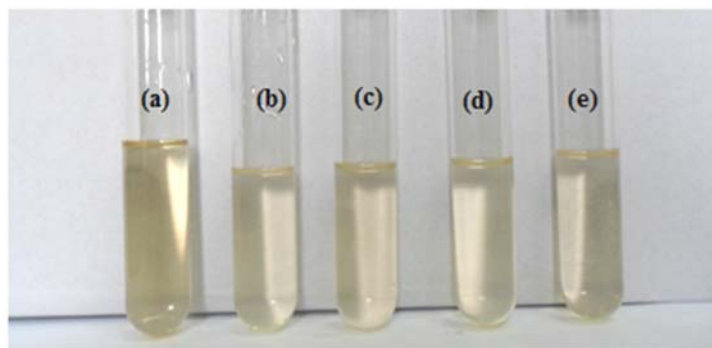
Com o acompanhamento espectrofotométrico na região UV/Vis (Figura 4), é possível observar uma significativa redução da região do visível (350-750 nm), o que sugere redução de cor no efluente. No entanto, na região do UV (200-350 nm), região característica de compostos orgânicos, a redução foi pouco significativa, indicando a presença destes compostos mesmo após 240 minutos de tratamento. Nota-se ainda na Figura 4, que o processo Fenton se estabilizou após 60 minutos.





**Figura 4.** Acompanhamento espectrofotométrico UV-Vis de degradação do efluente pelo processo Fenton .

Pode ser observado pela Figura 5, a descoloração do efluente no decorrer do processo Fenton. O efluente em estudo, por ter passado por tratamento primário e secundário na ETE, apresenta caráter passível de resposta ao tratamento Fenton, principalmente com relação à cor e turbidez. Após 240 minutos, os valores médios de remoção de cor, turbidez, DQO e fenóis totais foram de  $88 \pm 2.65\%$ ,  $86 \pm 1.72\%$ ,  $42 \pm 1.41\%$  e  $20 \pm 1.54\%$  respectivamente, resultados estes, que corroboram com os dados do espectro de UV/Vis.



**Figura 5.** Descoloração do efluente pelo processo Fenton. Tempos: 0 min (a); 60 min (b); 120 min (c); 180 min (d); 240 min (e).

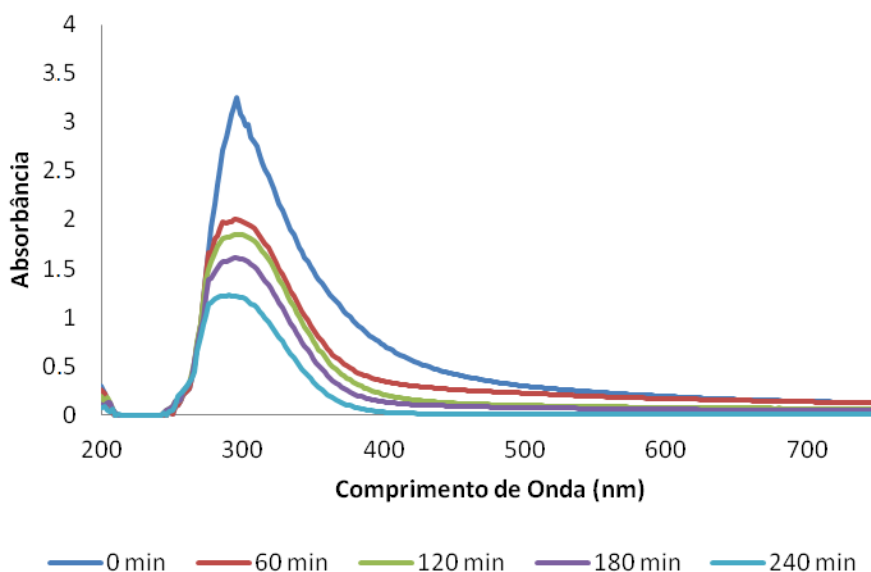
Em estudo similar, para remoção de DQO de efluentes da indústria de papel e celulose, Araújo et al. (2009), aplicaram o processo Fenton no efluente coletado após tratamento primário e obtiveram como resultado a remoção de 94.7% da DQO em 60 minutos de tratamento, nas condições  $[H_2O_2]:[Fe^{2+}] = 4:1$  e  $pH=5.0$ .

Como os resultados não foram satisfatórios na remoção da DQO e de fenóis totais, o efluente foi submetido ao tratamento pelos processos foto-Fenton com luz artificial e solar.

#### Processo foto-Fenton com radiação artificial

A elevada eficiência de degradação dos processos oxidativos avançados assistidos por fontes de radiação já foi amplamente demonstrada para vários tipos de efluentes (Pereira e Freire, 2005). A eficiência na degradação de poluentes orgânicos pode ser significativamente melhorada quando é associado ao processo Fenton fontes de radiação, sendo os processos foto-Fenton muito utilizados na degradação de inúmeras substâncias recalcitrantes, principalmente em razão da elevada eficiência de degradação propiciada pela componente fotoquímica (Souza et al., 2010).

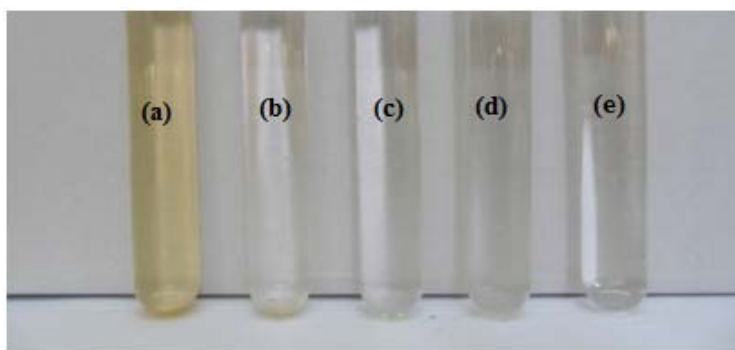
Os resultados mostram uma maior eficiência de degradação quando comparado ao processo Fenton, como mostrado na Figura 6, onde é possível acompanhar uma maior redução da banda na região do ultravioleta, bem como a redução total da banda na região do visível ao final do tratamento (240 minutos).



**Figura 6.** Acompanhamento espectrofotométrico UV-Vis de degradação do efluente pelo processo foto-Fenton artificial.

No processo foto-Fenton utilizando luz artificial, os valores médios na remoção de DQO, cor, turbidez e fenóis totais foram respectivamente de  $60 \pm 1.23\%$ ,  $99 \pm 0.36\%$  e  $99 \pm 0.75\%$  e  $80 \pm 0.97\%$  em 240 minutos.

Pela Figura 7, observa-se que a descoloração foi completa em 60 minutos, corroborando os dados espectrais da região do visível.



**Figura 7.** Descoloração do efluente pelo processo foto-Fenton artificial. Tempos: 0 min (a); 60 min (b); 120 min (c); 180 min (d); 240 min (e).

Depois da aplicação do processo foto-Fenton utilizando luz artificial, o efluente foi submetido ao tratamento utilizando luz solar, objetivando a comparação entre ambos os procesos.

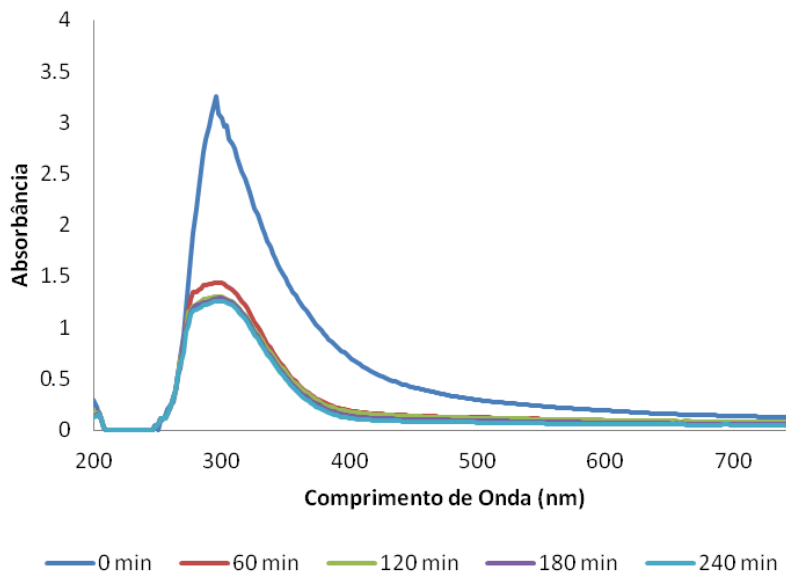
#### Processo foto-Fenton com radiação solar

A simplicidade de aplicação, sua eficiência de degradação aliado à possibilidade do aproveitamento da energia solar, são pontos atrativos do processo foto-Fenton solar, pois reduz os custos com energia, ao mesmo tempo em que se constituem como importante exemplo de tecnologia sustentável (Souza *et al.*, 2010; Nogueira *et al.*, 2007).

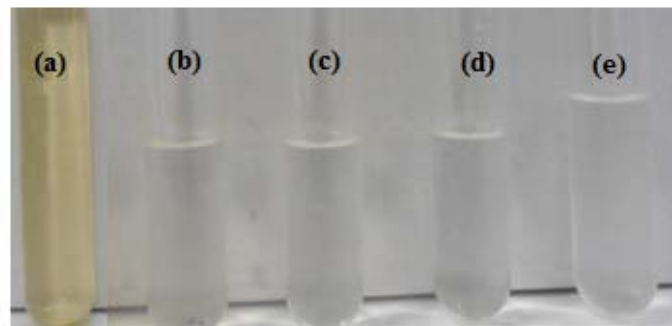
Conforme mostra a Figura 8, houve considerável redução do sinal espectral tanto na região do visível quanto na região do ultravioleta. No processo utilizando radiação solar, a remoção média de DQO, cor, turbidez e fenóis totais foram respectivamente de,  $52 \pm 1.57\%$ ,  $95 \pm 2.13\%$ ,  $93 \pm 1.87\%$  e  $75 \pm 1.16\%$  após 240 minutos de tratamento.

A redução da cor foi similar ao processo utilizando luz artificial, com descoloração total do efluente em 60 minutos de tratamento, como pode ser visto pela Figura 9.

Para a melhor comparação da eficiência dos processos aplicados ao efluente após 240 minutos, os resultados estão apresentados na Tabela 2.



**Figura 8.** Acompanhamento espectrofotométrico UV-Vis de degradação do efluente pelo processo foto-Fenton solar.



**Figura 9.** Descoloração do efluente pelo processo foto-Fenton solar. Tempos: 0 min (a); 60 min(b); 120 min (c); 180 min (d); 240 min (e).

**Tabela 2.** Valores médios e desvíos padrão do parâmetros Cor, Turbidez e DQO do efluente, conforme aplicação dos processos Fenton, foto-Fenton artificial e foto-Fenton solar.

Parâmetros	Remoção (%)		
	Processo Fenton	Processo foto-Fenton artificial	Processo foto-Fenton solar
Cor	88±2.65	99±0.36	95±2.13
Turbidez	86±1.72	99±0.75	93±1.87
DQO	42±1.41	60±1.23	52±1.57
Fenóis totais	20±1.54	80±0.97	75±1.16

Entre os processos estudados, o que apresentou melhor eficiência foi o foto-Fenton utilizando luz artificial, para todos os parâmetros estudados. No entanto, o processo utilizando luz solar foi muito similar, o que justifica sua aplicação, uma vez que usando o sol como fonte de luz resultaria na redução do custo energético de tratamento sem significativa perda de eficiência. Os valores de intensidade de radiação medidos, tanto para a luz artificial quanto para a luz solar correspondem, respectivamente, à 61.828 e 5.038 mW/cm<sup>2</sup>.

Para a redução de cor em efluente papaleiro, cita-se o estudo de Catalkaya e Kargi (2007), que estudaram a eficiência dos processos Fenton e foto-Fenton, com remoção de 85% da cor, em pH 5 e em tempo de 30 minutos no processo Fenton, enquanto no processo foto-Fenton artificial, atingiram um percentual de remoção de 82% em apenas 5 minutos, percebe-se assim, maior eficiência em remoção da cor quando há fotólise no tratamento.

Segundo Rabelo (2005), em seu estudo de aplicação do processo foto-Fenton solar, para o tratamento de efluente de indústria de celulose Kraft branqueada, foi alcançada remoção da DQO e cor, respectivamente em 70.2% e 99%. Em estudo similar, numa relação de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e Fe<sup>2+</sup> de 100:1, respectivamente, 2000 e 20 mg.L<sup>-1</sup>, atingiu remoção de 95% da DQO. Já aplicando o processo foto-Fenton com radiação artificial, concentrações de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e Fe<sup>2+</sup>, respectivamente, 2000 e 20 mg.L<sup>-1</sup>, atingiram uma remoção de 73.5% de DQO.

A combinação de POA pode ser uma alternativa como um processo combinado à processos biológicos, considerando a capacidade do POA em aumentar a biodegradabilidade deste tipo de efluente, e que implicaria no menor custo global de tratamento, ou ainda, como um pós tratamento, com a finalidade do reúso da água no sistema produtivo.

Neste contexto, Marayo e colaboradores (2013) estudaram a combinação de processo biológico com um pós tratamento com POA e foram obtidos bons resultados nas remoções de DQO e de cor (cerca de 90% e 95%, respectivamente.); bem como aumentou a biodegradabilidade do efluente final, permitindo, por conseguinte, o potencial de recirculação da água residual.

### **Conclusão**

Esta pesquisa aponta que o efluente foi passível de resposta em todos os processos estudados. O processo foto-Fenton com luz artificial apresentou os resultados mais expressivos na remoção de todos os parâmetros, principalmente de cor e turbidez, com 99% de redução em ambos os casos. A maior eficiência do processo foto-Fenton com luz artificial justifica-se pela maior intensidade e constância da radiação durante o tratamento. Entretanto, para aplicação real em larga escala nas ETEs, o custo desta tecnologia é alta, assim, o processo assistido por radiação solar se torna o mais atrativo, uma vez que, também promoveu reduções significativas de cor, turbidez, DQO e fenóis.

## Referencias bibliográficas

- Ali, M.E., Sreekrishnan, T.R. (2001) Aquatic toxicity from pulp and mill effluents : A review. *Advances in Environmental Research*, **5**(2), 175-196. doi:10.1016/S1093-0191(00)00055-1
- APHA-AWWA-WEF. (1995) Standart Methods for Examination of Water and Wastewater. 19th edition. Amer. Public. Health Assoc.: Washington, D.C.
- Araújo, A.L.P., Cossich, E.S., Tavares, C.R.G. (2009) Remoção de DQO de efluente de indústria de celulose e papel empregando reagente Feton. *Scientia Plena*, **5**(7), 1-9.
- Catalkaya, E.B., Kargi, F. (2007) Color, TOC and AOX removals from pulp mill effluent by advanced oxidation processes: A comparative study. *Journal of Hazardous Materials*, **139**(2), 244-253. doi:10.1016/j.jhazmat.2006.06.023
- CETESB (2008). Guia Técnico Ambiental da Indústria de Papel e Celulose. São Paulo, 49 p. Acesso em 23 fev. 2016, disponível em: [http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia/producao\\_limpa/documentos/papel.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/tecnologia/producao_limpa/documentos/papel.pdf)
- CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2011) Resolução Nº 430, De 13 de Maio de 2011. Acesso em 21 jul 2016. Disponível em: [http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/propresol\\_lanceflue\\_30e31mar11.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/propresol_lanceflue_30e31mar11.pdf)
- Durigan, M.A.B., Vaz, S.R., Peralta-Zamora, P. (2012) Degradação de poluentes emergentes por processos Fenton e foto-Fenton. *Química Nova*, **35**(7), 1381-1387. doi:10.1590/S0100-40422012000700018
- Freie, R.S., Pelegrini, R., Kubota, L.T., Durán, N., Peralta-Zamora, P. (2000). Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas. *Química Nova*, **23**(4), 504-511. doi:10.1590/S0100-4042200000400013
- Lange, L.C., Alves, J.F., Amaral, M.C.S., Melo Júnior, W.R. (2006) Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processo oxidativo avançado empregando reagente de Fenton. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **11**(2) 175-183. doi:10.1590/S1413-41522006000200011
- Merayo, N., Hermosilla, D., Blanco, L., Cortijo, L., Blanco, A. (2013) Assessing the application of advanced oxidation process and their combination with biological treatment, to effluents from pulp and paper industry. *Journal of Hazardous Materials*, **262**, 420-427. doi:10.1016/j.jhazmat.2013.09.005
- Neves, L.C. (2014) *Aplicação De Microfiltração E Ultrafiltração Como Pós-Tratamento De Efluente De Lodo Ativado De Uma Indústria De Papel E Celulose*. Dissertação (Mestrado Ciências Florestais), Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, da Universidade Estadual Do Centro-Oeste, 77p.
- Nogueira, R.F.P., Trovó, A.G., Silva, M.R.A., Villa, R.D., Oliveira, M.C. (2007) Fundamentos e aplicações ambientais dos processos fenton e foto-Fenton. *Química Nova*, **30**(2), 400-408. doi:10.1590/S0100-40422007000200030
- Oliveira, M.C., Nogueira, R. F. P., Neto, J. A. G. (2001) Sistema de injeção em fluxo espectrofotométrico para monitorar peróxido de hidrogênio em processo de fotodegradação por reação foto-Fenton. *Química Nova*, **24**(2), 188-190. doi:10.1590/S0100-40422001000200007
- Pereira, W.S., Freire, R.S. (2005) Ferro zero: uma nova abordagem para o tratamento de águas contaminadas com compostos orgânicos poluentes. *Química Nova*, **28**(1), 130-136. doi:10.1590/S0100-40422005000100022
- Pokhrel, D., Viraraghavan, T. (2004) Treatment of pulp and paper mill wastewater - a review. *Science of the Total Environment* **333**(1-3), 37 – 58. doi:10.1016/j.scitotenv.2004.05.017
- Rabelo, M.D. (2005) *Avaliação da aplicação combinada dos processos foto-Fenton e biológico no tratamento de efluentes de indústria de papel e celulose Kraft branqueada*. Tese (Doutorado Agroquímica), Programa de Pós-Graduação em Agroquímica, da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 116 p.
- Souza, K.V., Zamora, P.G.P., Zawadzki, S.F. (2010) Esferas de Quitosana/Fe na Degradação do Corante Azul QR-19 por Processos Foto-Fenton Utilizando Luz Artificial ou Solar. *Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia*, **20**(3), 210-214. doi: 10.1590/S0104-14282010005000035
- Tambosi, J.L. (2005) *Remediação de efluente da indústria de papel e celulose por processos oxidativos avançados e coagulação férrica*. Dissertação (Mestrado Engenharia Química), Programa de Pós-Graduação de Engenharia Química, da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005p.



- Teixeira, C.P.A.B, Jardim, W.F. (2004) Processos Oxidativos Avançados: Conceitos Teóricos. *Caderno Temático*, vol. 3, UNICAMP. Campinas/SP.
- Thompson, G., Swain, J, Kay, M., Forster. C.F. (2001) The treatment of pulp and paper mill e,uent: a review. *Bioresource Technology*, **77**(3), 275-286. doi:10.1016/S0960-8524(00)00060-2
- Vasconcelos, D.V., Gomes, A. (2009) Tratamento de efluentes de postos de combustíveis para o reúso usando processos oxidativos avançados. *Cadernos UniFOA* edição nº 11