



Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal

of Applied Science

ISSN: 1980-993X

ambi-agua@agro.unitau.br

Universidade de Taubaté

Brasil

Subtil, Eduardo Lucas; Mierzwa, José Carlos; Hespanhol, Ivanildo  
Avaliação do desempenho do sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no tratamento de efluentes provenientes do processo  
de tratamento térmico de emulsões de água e óleo  
Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science, vol. 4, núm. 3, 2009, pp. 169-180  
Universidade de Taubaté  
Taubaté, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92812346012>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe , Espanha e Portugal  
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto



## Avaliação do desempenho do sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no tratamento de efluentes provenientes do processo de tratamento térmico de emulsões de água e óleo (doi:10.4136/ambi-agua.110)

Eduardo Lucas Subtil<sup>1</sup>; José Carlos Mierzwa<sup>2</sup>; Ivanildo Hespanhol<sup>3</sup>

Centro Internacional de Referência em Reúso de Água -CIRRA/IRCWR - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica, Cidade Universitária, USP, São Paulo  
E-mail: <sup>1</sup>eduardo.subtil@poli.usp.br; <sup>2</sup>mierzwa@usp.br; <sup>3</sup>ivanildo.hespanhol@poli.usp.br

### RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial de utilização do processo de oxidação avançado UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para tratar um efluente contendo elevada carga de material orgânico em solução, resultante do processo de tratamento térmico de emulsões de óleo solúvel. Os ensaios de tratabilidade foram realizados em um sistema fotoquímico em batelada com reciclo, sendo o efluente bruto caracterizado pela análise de pH, turbidez, cor, DQO e COT. Os resultados experimentais indicaram a viabilidade técnica de aplicação do sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, tendo sido atingidos níveis de remoção de COT acima de 90%. Entretanto, para a remoção de um log de COT (EE/0) desse efluente foram necessários 455,5 kw.h.m<sup>-3</sup> para uma relação  $\alpha = 10 \text{ mg H}_2\text{O}_2/\text{mg COT}$ , conduzindo a um elevado custo operacional do sistema, para as condições avaliadas.

**Palavras-chave:** Processos Oxidativos Avançados; emulsões água-óleo; remoção de COT.

### Application of UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system to treatment of wastewater arising from thermal treatment of oil-water emulsions

### ABSTRACT

In this work it is presented the results of bench scale tests using Advanced Oxidation Process (AOP) in a UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> system, for the treatment of an industrial effluent with a high concentration of dissolved organic matter, resulted from thermal treatment of oil-water emulsions. Treatability tests were carried out in a batch photochemical system with recycle, and the raw effluent was characterized by the analysis of pH, turbidity, color, COD and TOC. Results from these assays shown that UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process is technically feasible resulting in TOC removal above 90%. However, for one log TOC removal from this effluent the energy required was about 455.5 kw.h.m<sup>-3</sup>, for an alpha relation of 10 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/mg COT, resulting in a higher operational cost, considering the evaluated conditions.

**Keywords:** Photochemical Oxidation Advanced Process; oil-water emulsions; TOC removal.

### 1. INTRODUÇÃO

Com o foco atual sobre projetos de reúso de água e o seu papel no ciclo natural da água, pesquisas direcionadas para tecnologias avançadas de tratamento de águas residuárias, com custos competitivos, nunca foram tão importantes. Não obstante, legislações cada vez mais restritivas e limitações dos processos ditos convencionais em atendê-las têm estimulado o

desenvolvimento de processos mais eficientes para o tratamento de efluentes industriais e de esgotos sanitários. Dentre essas tecnologias destacam-se os Processos Oxidativos Avançados (POA).

Os POA têm sido utilizados, principalmente, para tratar efluentes com elevada toxicidade e compostos orgânicos de baixa biodegradabilidade. De forma geral, tais processos consistem na produção de intermediários altamente reativos, sobretudo o radical hidroxil (·OH), capaz de oxidar a maioria das moléculas orgânicas (Alfano et al., 2000; Andreozzi et al., 1999). Esses radicais livres reagem de 10<sup>6</sup> a 10<sup>9</sup> vezes mais rapidamente que outros oxidantes químicos enérgicos, tais como ozônio e peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), utilizados em processos de oxidação química convencional (Ince e Tezcanli, 1999).

Os radicais hidroxil têm meia vida de, aproximadamente, 10 µs e são capazes de reagir muito rapidamente e pouco seletivamente com a maioria dos compostos orgânicos e inorgânicos no meio aquoso (Caretti e Lubello, 2003). Além disso, o ·OH tem potencial de oxidar, com maior eficácia, contaminantes orgânicos para CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e sais minerais (i.e. mineralização), ao contrário dos oxidantes convencionais que, só em alguns casos, conseguem mineralizar completamente a matéria orgânica (Vogelpohl e Kim, 2004).

Dentre os vários processos oxidativos classificados como POA, o processo baseado na combinação da ação da luz ultravioleta e peróxido de hidrogênio (UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) é o mais antigo (Litter, 2005). Esse processo ocorre em duas etapas principais: formação de radicais hidroxil pela fotólise direta do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (Equação 1) e oxidação das moléculas orgânicas pelos radicais formados (Equações 2, 3 e 4) (Braun e Oliveros, 1997). Em alguns casos, a energia do fóton também é capaz de romper ligações químicas nas moléculas orgânicas, promovendo a sua degradação.



As fontes disponíveis comercialmente para geração de luz com comprimento de onda na região do espectro UV, para formação do radical ·OH pela fotólise do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, são limitadas por três tipos: lâmpadas de deutério, xenônio e vapor de mercúrio, sendo as de vapor de mercúrio as mais utilizadas em aplicações laboratoriais e industriais (Cavicchioli e Gutz, 2003). Dessa forma, tanto lâmpadas de vapor de mercúrio de baixa ou média pressão podem ser utilizadas.

Entretanto, as lâmpadas de baixa pressão podem não ser a melhor escolha para o processo UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pois são praticamente monocromáticas com o pico de emissão de 254 nm e sobre esse comprimento de onda o coeficiente de adsorção molar do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> é de apenas 19,6 L/mol.cm (USEPA, 1998; Glaze et al., 1987). Assim, caso essas lâmpadas sejam utilizadas são necessárias elevadas concentrações de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, mas o próprio peróxido de hidrogênio pode atuar como sequestrador de radicais OH, reduzindo a eficiência do sistema. Para superar essa limitação, lâmpadas de emissão de energia UV em banda larga de alta intensidade e média pressão podem ser usadas, pois apresentam um espectro de emissão caracterizado por linhas mais alargadas e um fundo contínuo que cobre toda região UV, inclusive a faixa do ultravioleta próximo (UV-A), além de emitirem radiação na região do visível e infravermelho (USEPA, 1998).

O sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tem se mostrado eficiente na degradação de diversos poluentes. Podem-se destacar aplicações bem-sucedidas desse sistema para o tratamento de pigmentos (Arslan et al., 2000), águas subterrâneas contaminadas por gasolina (Cater et al., 2000), compostos fenólicos (Beltrán et al., 1997), compostos nitroaromáticos (Einschlag et al., 2002), benzeno, cloroetano, pesticidas e cetonas (Glaze et al., 1987). Uma vez que não há

adição de outros compostos químicos além do peróxido de hidrogênio, os efluentes tratados podem ser realimentados em diferentes pontos de demanda de água nas instalações industriais sem restrições adicionais, desde que atendam aos objetivos de qualidade necessários.

Apesar de serem importantes ferramentas do ponto de vista ambiental, grande parte dos estudos sobre os POA são direcionados à degradação de contaminantes específicos. Entretanto, a maioria das correntes de efluentes gerados nos processos industriais apresenta composição complexa, estando presente uma ampla gama de contaminantes, o que dificulta a reprodução dos resultados experimentais em escala real.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de aplicação de um sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> para remoção de material orgânico predominantemente composto por hidrocarbonetos, com base nas medidas de COT e DQO, de um efluente industrial proveniente de um processo de tratamento por evaporação com compressão de vapor de emulsões água e óleo.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

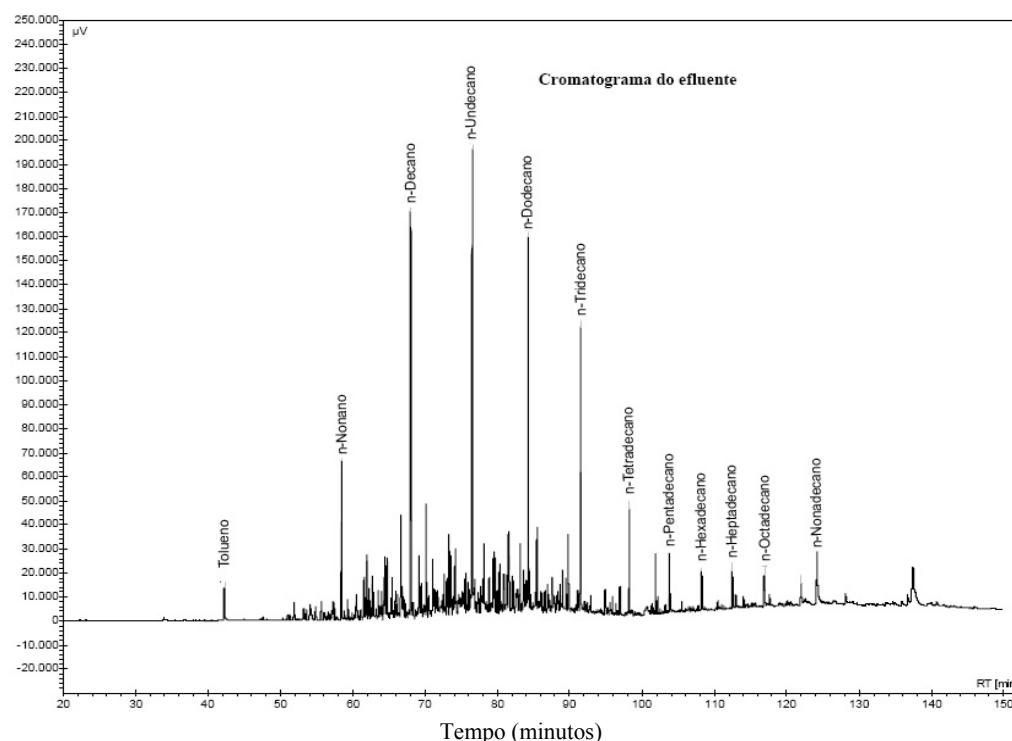
### 2.1. Caracterização do efluente

O efluente utilizado nesta pesquisa é o condensado resultante do processo de evaporação com compressão de vapor de correntes industriais de usinagem e estamparia de processo mecânico contendo óleos sintéticos e emulsões água e óleo. Os resultados da análise cromatográfica (figura 1), realizado por um Cromatógrafo a gás (marca Varian, modelo CP-3800) do efluente bruto antes do processo de separação, revelou a presença preponderante de uma mistura de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos de C<sub>9</sub> a C<sub>11</sub>, ácido oléico (C<sub>18</sub>H<sub>34</sub>O<sub>2</sub>) e ácido palmítico (C<sub>16</sub>H<sub>32</sub>O<sub>2</sub>), pequenas proporções de tricloroetileno, tolueno e ácido acético (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O<sub>2</sub>), traços de metanol (CH<sub>4</sub>O), etanol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O), ácido propanoico (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub>), ácido butanoico (C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>O<sub>2</sub>), e dos ésteres palmitato de metila (C<sub>17</sub>H<sub>34</sub>O<sub>2</sub>), oleato de metila (C<sub>19</sub>H<sub>36</sub>O<sub>2</sub>) e estearato de metila (C<sub>19</sub>H<sub>38</sub>O<sub>2</sub>), ressaltando-se que o cromatograma não apresenta resultados para substâncias com baixo peso molecular, cujo tempo de retenção na coluna cromatográfica é inferior a 20 minutos.

Em função das características do processo de evaporação, o condensado produzido ainda apresenta residuais de compostos orgânicos, o que impede seu lançamento no ambiente ou reúso em outros processos industriais. Na Tabela 1, são apresentadas as características básicas do efluente derivado pelo processo de evaporação e utilizado nesse estudo. Para eliminar a interferência do peróxido de hidrogênio na análise de DQO, foi adicionado permanganato de potássio (0,01 N) nas amostras antes de proceder com o método analítico. É importante ressaltar que todas as amostras coletadas apresentaram residual de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, indicado pelo consumo de permanganato de potássio.

**Tabela 1.** Características do efluente utilizado nos ensaios fotoquímicos.

Parâmetros	Valor	Método analítico
pH	8,8 ± 0,2	Método eletrométrico: pH-metro
Turbidez (NTU)	148 ± 56	Turbidímetro da marca Policontrol
Cor (uC)	168 ± 3	Colorímetro da marca Policontrol
DQO (mg O <sub>2</sub> /L)	3496 ± 125	Oxidação por dicromato de potássio (Apha, 1995)
COT (mg C/L)	764 ± 11	Analizador TOC-V CPH da Shimadzu



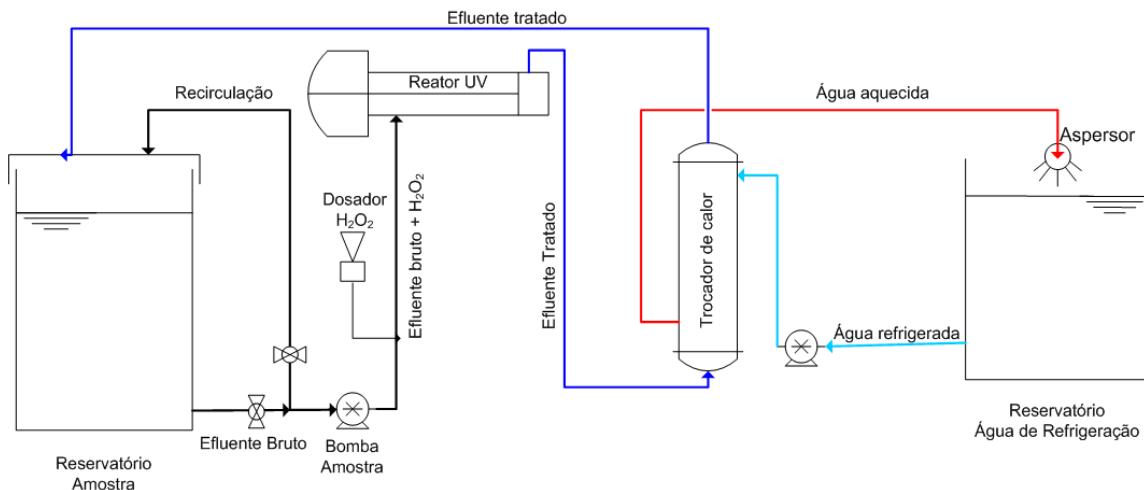
**Figura 1.** Cromatograma do efluente bruto antes do processo de separação por compressão.

## 2.2. Sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

O sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, disponível no Centro Internacional de Referência em Reúso de Água (CIRRA), é composto por um tanque de armazenagem do efluente, bomba dosadora de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, reator fotoquímico, trocador de calor e um tanque com água de refrigeração (Figura 2). O reator fotoquímico é da marca Germetec, confeccionado em aço inoxidável e composto por um tubo de quartzo e lâmpada UV de vapor de mercúrio de média pressão (Tabela 2). O sistema foi operado em batelada com reciclo, ou seja, o efluente após passar pelo reator retornava para o tanque de armazenagem.

**Tabela 2.** Principais características da lâmpada UV e do reator.

Lâmpada	Reator		
Potência (watts)	1600 w	Diâmetro (mm)	64
Temperatura de operação da lâmpada (°C)	600 – 800	Comprimento (mm)	270
Conteúdo de mercúrio (g)	< 1,0	Volume útil do reator (L)	0,67



**Figura 2.** Esquema do sistema UV/ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, em que: (—) efluente bruto; (—) efluente tratado; (—) água aquecida; (—) água refrigerada.

### 2.3. Determinação da quantidade de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

A quantidade e concentração de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> utilizada nos experimentos foram determinadas de acordo com a quantidade mássica proporcional à massa de carbono orgânico total presente em um determinado volume de efluente, definida como sendo a razão  $\alpha = \frac{C_{H_2O_2}}{COT_0}$ . Por ser tratar de um efluente real e estando sujeito às variações do processo industrial, foi necessário o monitoramento de COT dos efluentes antes de cada ensaio. Assim, definindo-se a razão  $\alpha$  e conhecendo-se os valores de COT<sub>0</sub> foi possível calcular a quantidade de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> empregada em cada ensaio pela Equação 5.

$$V_{H_2O_2} = \frac{0,1 \times \alpha \times COT_0 \cdot V_{\text{efluente}}}{\rho_{H_2O_2} \cdot Teor_{H_2O_2}} \quad [5]$$

em que:

$V_{H_2O_2}$ : volume de peróxido de hidrogênio (mL);

$COT_0$ : carbono orgânico no início do experimento (mg C.L<sup>-1</sup>);

$V_{\text{efluente}}$ : volume de efluente utilizado (L);

$\rho_{H_2O_2}$ : densidade da solução de peróxido de hidrogênio (g/cm<sup>3</sup>)

$Teor_{H_2O_2}$ : teor mássico (m/m) da solução de peróxido de hidrogênio (%).

0,1: fator de correção.

### 2.4. Procedimento experimental

Foram realizados dois ensaios de tratabilidade conforme apresentado na Tabela 3. Deve-se ressaltar que não foi avaliada, individualmente, a degradação direta do efluente por radiação UV e nem por H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, pelo fato de alguns autores reportarem a baixa eficiência desses processos, isoladamente, na oxidação de compostos orgânicos, mesmo para elevados tempos de reação (Xu et al., 2007; 2009; Wang et al., 2005; Sundstrom et al., 1989). As amostras eram coletadas na linha de descarga do reator, sendo o intervalo de coleta definido por testes preliminares. A temperatura foi controlada por meio de um trocador de calor casco e tubo, instalado logo após o reator UV, com faixa de operação do efluente entre 40 - 50 °C, utilizando-se água potável como fluido de resfriamento. O controle da vazão foi feito por meio de válvula globo instalada na descarga da bomba de alimentação, com a verificação pelo rotâmetro, com escala de 0 a 132 L/h.

A adição do H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, nos dois ensaios, foi efetuada nas duas primeiras horas a partir do início dos ensaios, considerando-se o trabalho Lira (2006), que demonstrou não haver diferença nos resultados quando o H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> é adicionado de forma continua ou em partes. A duração total dos ensaios foi de 9 horas, resultando em um tempo de irradiação de 15 minutos, para todo o volume de efluente.

**Tabela 3.** Principais parâmetros operacionais.

Parâmetros	Ensaio 1	Ensaio 2	Unidades
Volume de Amostra	25	25	Litros
Vazão de Operação	360	180	L.h <sup>-1</sup>
Tempo de Reação	9,3	9,3	horas
<sup>1</sup> TDH no reator	6,7	13,4	Segundos
<sup>2</sup> TDH no sistema	4,2	8,3	Minutos
$\alpha$	10	10	mg H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> /mg COT
Dose de UV no reator	4173		mW/cm <sup>2</sup>
Temperatura de operação	40 - 50	40 - 50	°C

<sup>1</sup>Tempo que o efluente permaneceu em contato com a luz UV no reator por passagem.

<sup>2</sup>Tempo gasto para todo efluente passar pelo reator.

## 2.5. Equacionamento do sistema

O equacionamento do sistema foi feito por meio de um balanço de massa para o reator UV e tanque de armazenamento de efluente (Figura 3). Para isso, considerou-se que só ocorre reação química no reator, propondo-se uma cinética de pseudoprimeira ordem, já que o peróxido de hidrogênio foi adicionado em excesso e permaneceu durante todo experimento, indicado pelo consumo de permanganato de potássio em todas as amostras coletadas (USEPA, 1998). Além disso, o sistema está em regime permanente, ou seja, não há acúmulo no reator.

Balanço de Massa no Reator UV (Fluxo pistonado):

$$Q \cdot C = Q \cdot (C + dC) + (-r_C) \cdot dV$$

$$Q \cdot dC = -(-r_C) \cdot dV$$

$$-r_C = k \cdot C$$

$$\frac{dC}{C} = -\frac{k}{Q} \cdot dV$$

Integrando:

$$C_s = C \cdot e^{-k \cdot \tau}$$

[6]

em que:

K = constante da cinética de reação (h<sup>-1</sup>);

$\tau$  = tempo espacial em horas (V<sub>r</sub>/Q);

C e C<sub>s</sub> = Concentrações de matéria orgânica na entrada e saída do reator, expressas em COT (mg.L<sup>-1</sup>);

V<sub>r</sub> = Volume do reator (L);

Q = vazão (L.h<sup>-1</sup>)

Balanço de massa no tanque:

$$V_T \cdot \frac{dC}{dt} = Q \cdot C_s - Q \cdot C$$

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{\theta} \cdot (C_0 - C); \quad \theta = \text{tempo de detenção hidráulico (V}_T/Q)$$

substituindo C<sub>s</sub>, dado pela equação 6:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{1}{\theta} \cdot (C_s - C); \quad \theta = \text{tempo de detenção hidráulico (V}_T/Q)$$

substituindo C<sub>s</sub>, dado pela equação 6:

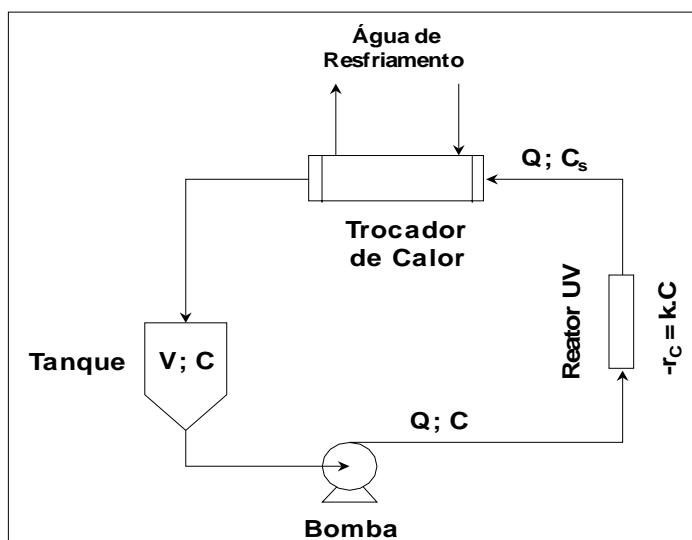
$$\frac{dC}{dt} = \frac{C}{\theta} \cdot (e^{-k\tau} - 1)$$

rearranjando e integrando:

$$C = C_0 \cdot e^{\frac{(e^{-k\tau}-1)}{\theta} \cdot t} \quad [7]$$

em que:

C<sub>0</sub> = concentração de matéria orgânica no início do ensaio, expressa em COT (mg.L<sup>-1</sup>)



**Figura 3.** Fluxograma do sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> e os parâmetros utilizado no balanço de massa.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Resultados dos ensaios de oxidação

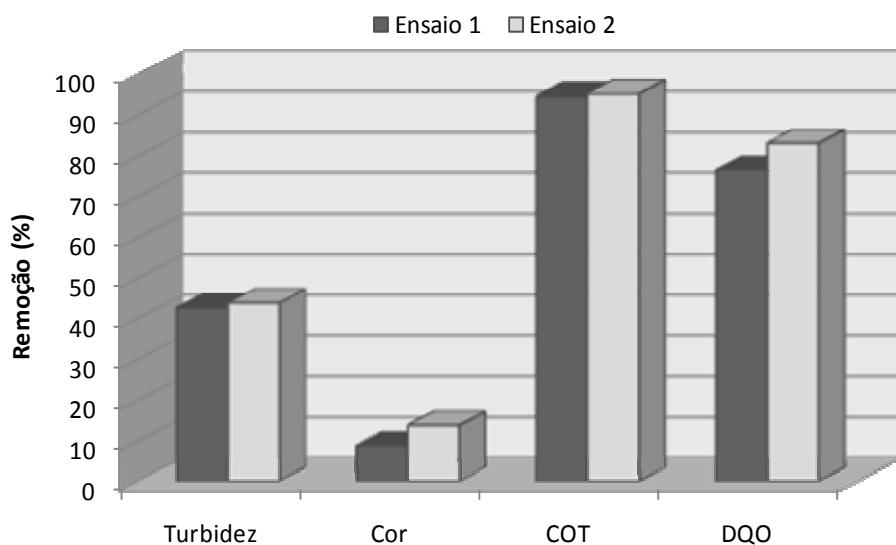
Na Figura 4, podem ser vistos os resultados obtidos nos ensaios, com relação à eficiência de redução da concentração de COT e da DQO. Pela análise da figura 4, verifica-se que o desempenho do sistema de tratamento para o segundo ensaio foi ligeiramente superior ao do primeiro ensaio. As remoções de DQO e COT foram de 83% e 95%, respectivamente.

Os resultados referentes à remoção das variáveis controladas em função do tempo estão apresentados na Figura 5. A análise dos resultados apresentados mostra que não há um comportamento padrão para a variação da maioria das variáveis controladas, com exceção do COT. Para a DQO, no início do experimento, ocorre um aumento do seu valor e a remoção só passa a ser significativa a partir de 5 horas, atingindo uma redução máxima ao final dos experimentos, 80%.

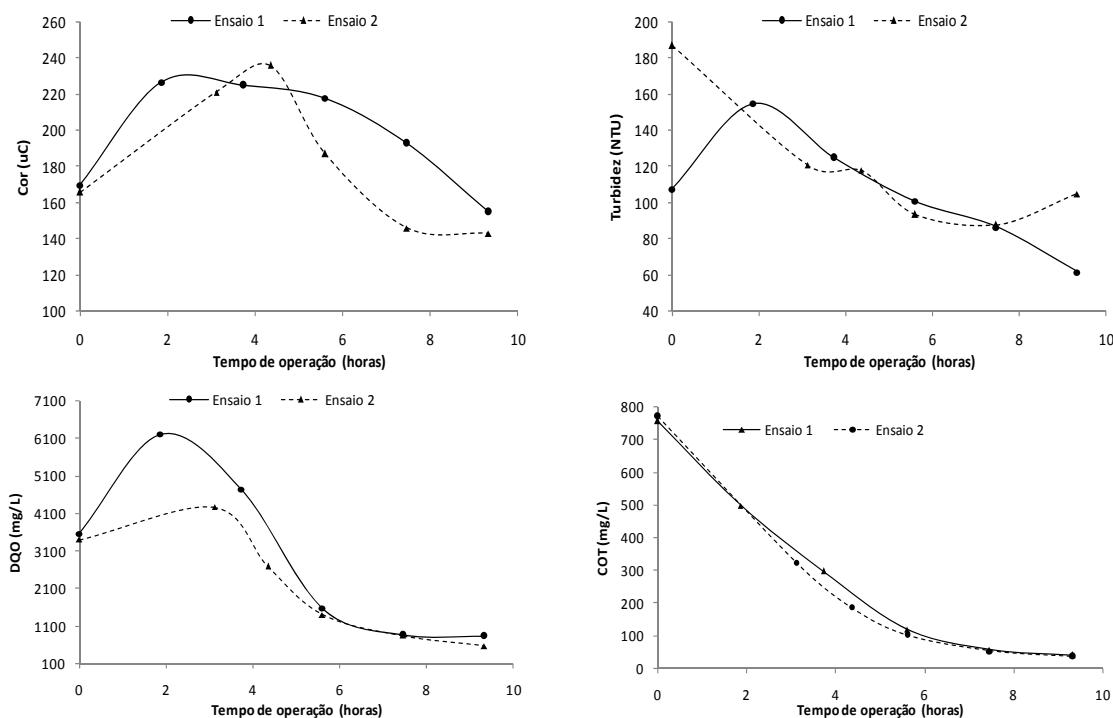
Semelhante ao que ocorre com a DQO, a cor aumenta nas primeiras horas dos experimentos e depois é reduzida, porém a eficiência é pouco significativa, próxima a 10%. Provavelmente compostos intermediários formados nas reações de oxidação são os responsáveis pela cor, já que ao final dos experimentos a concentração de COT é próxima de

50 mg de C/L e a DQO é de 800 mg O<sub>2</sub>/L. Os resultados para remoção de turbidez foram melhores que para cor, com exceção do início do ensaio 1, em que há aumento da turbidez.

Em relação ao pH, houve redução nos dois ensaios, com valores finais de 7,7 e 7,9. No inicio do experimento, a diminuição brusca é causada pela adição do peróxido de hidrogênio, já que este foi adicionado nas duas primeiras horas. Já o pH mais baixo ao final da reação comparado com seu valor inicial pode ser atribuído ao CO<sub>2</sub> gerado durante o processo ou à presença de ácidos orgânicos remanescentes ao final da reação (Stefan e Bolton, 1998).



**Figura 4.** Eficiência de remoção dos contaminantes avaliados ao final de cada ensaio.



**Figura 5.** Perfil temporal das variáveis cor, turbidez, DQO, COT e pH.

Em comparação com estudos desenvolvidos por outros autores, Juang et al. (1997), que investigaram o processo UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em efluentes petroquímicos brutos ou previamente polidos por tratamento biológico, Stepnowski et al. (2002) que estudaram o emprego do sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> como uma técnica de tratamento de efluentes gerados em refinaria de petróleo, previamente submetidos a um tratamento físico-químico e Lira et al. (2006), estudando a degradação de efluentes de indústria petroquímica em um sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> em um reator operado de forma continua, confirma-se a necessidade de estudos de tratabilidade para cada caso específico, uma vez que vários fatores podem afetar o desempenho do sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Entre esses fatores destacam-se a estrutura química e concentração dos contaminantes, a presença de cor, turbidez e sequestrantes de radicais hidroxil e dose de radiação UV. Outro aspecto a ser considerado é que os processos de oxidação fotoquímica são utilizados, na maioria dos casos, como processo preliminar ou complementar em sistemas de tratamento de efluentes. Assim, o tipo de pré-tratamento adotado também influencia o desempenho do processo de oxidação, o que deverá ser mais bem avaliado em estudos complementares.

### 3.2. Estimativa da constante de remoção de COT

Pelo ajuste da curva de redução na concentração de COT com o tempo, considerando-se o modelo apresentado no item 2.5 (Figura 6), verifica-se que a hipótese de cinética de pseudo-primeira ordem é válida, obtendo-se, por meio da linearização da equação (7), valores da constante de remoção de COT iguais a 12,68 h<sup>-1</sup> e 12,72 h<sup>-1</sup>, para os ensaios 1 e 2, respectivamente.

Pode-se observar que o aumento no tempo de detenção no reator fotoquímico de 6,7 para 13,4 segundos, não afetou a constante de reação, o que pode ser um indicativo de que as doses de radiação UV utilizadas foram elevadas. Isso implica a necessidade de uma avaliação mais precisa da influência da dose de radiação UV na eficiência do processo.

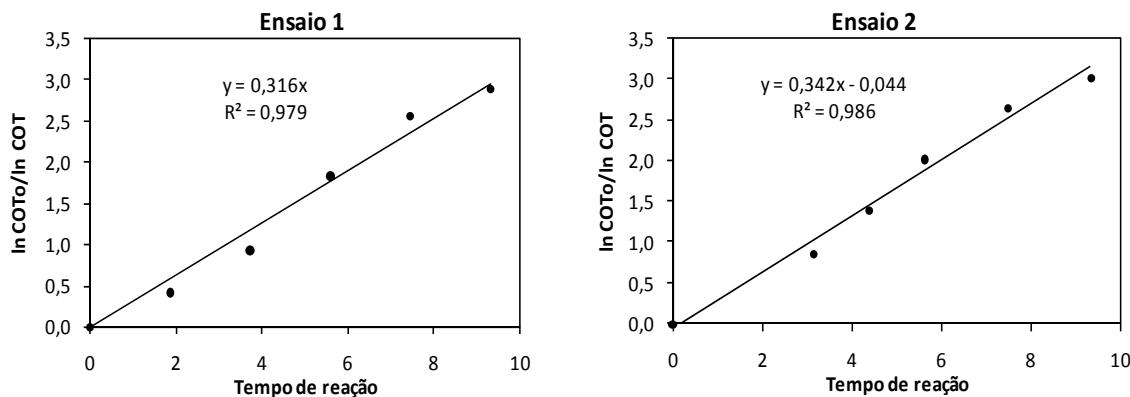


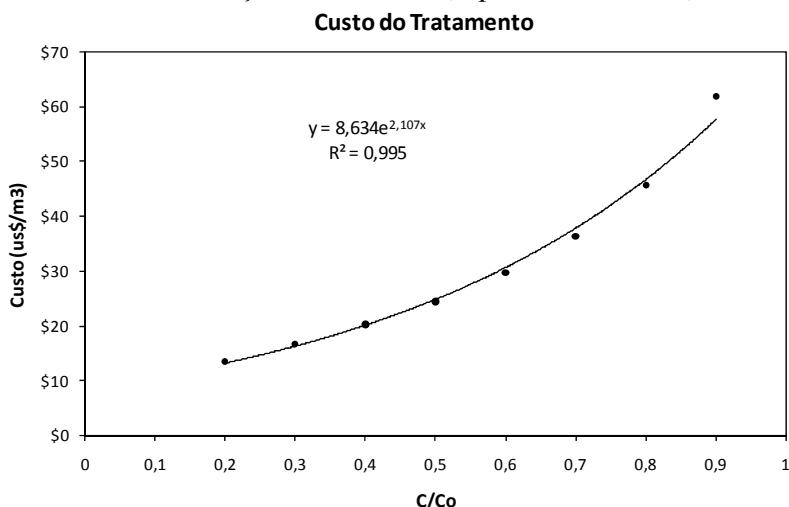
Figura 6. Linearização dos dados para estimativa das constantes de remoção de COT.

### 3.3. Estimativa preliminar do custo de tratamento

Considerando-se os resultados obtidos nos experimentos, foi feita uma estimativa dos custos de tratamento do efluente, levando em consideração o consumo de energia e de peróxido de hidrogênio. Para isso, considerou-se um custo de R\$ 0,27 por kWh, podendo ser menor no caso de contrato de demanda (AES Eletropaulo, 2009), e R\$ 2,5 por kg de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (50%).

Na Figura 7, encontra-se apresentado o custo do tratamento em função da eficiência de redução de COT. Além disso, determinou-se o parâmetro EE/0, o qual representa a energia necessária para a remoção de uma ordem de grandeza do contaminante estudado. Para o ensaio 1 e 2, os resultados de EE/0 foram respectivamente de 469 kwh/m<sup>3</sup> e 442 kwh/m<sup>3</sup>.

Devido, sobretudo, ao elevado gasto energético, o custo médio para tratar um metro cúbico desse efluente com 90% de remoção de COT é de, aproximadamente, US\$ 62,00.



**Figura 7.** Custo médio do tratamento em função da remoção de COT, levando em consideração o consumo de energia e peróxido de hidrogênio.

## 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos no desenvolvimento do trabalho apresentado, é possível concluir:

- os ensaios realizados demonstraram a adequação do modelo de pseudoprimeira ordem para a cinética de degradação do COT pelo processo UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, principalmente pela utilização de peróxido de hidrogênio em excesso.

- o processo UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> é tecnicamente eficiente para o tratamento dos efluentes aquosos originados do tratamento térmico de emulsões água e óleo. Em geral, após o término da reação fotoquímica, mais de 76% da DQO e 94% do COT foram removidos, mesmo o efluente contendo elevadas concentrações desses contaminantes. Além da remoção de COT e DQO, houve redução de turbidez e, com menor eficiência, de cor, melhorando o aspecto visual do efluente.

Diante dos resultados obtidos na avaliação do custo de tratamento, o sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> deve ser investigado em conjunto com outra tecnologia para que seja economicamente viável, podendo resultar em um efluente com boa qualidade e potencial para reúso. Também recomenda-se a realização de ensaios com a utilização de lâmpadas UV de menor potência.

## 5. REFERÊNCIAS

AES ELETROPAULO. Tarifas para o fornecimento de energia elétrica. Resolução nº 846, de 30/06/2009 da ANEEL - DOU de 03/07/2009. Disponível em: <<http://www.eletropaulo.com.br/portal/interna/?idConteudo=640>>. Acesso: 10 set. 2009.

ALFANO, O. M.; BAHNEMANN, D.; CASSANO, A. E.; DOLLERT, R.; GOSLICH, R. Photocatalysis in water environments using artificial and solar light. **Catalysis Today**, v. 58, p. 199-230, 2000.

SUBTIL, E. L.; MIERZWA, J. C.; HESPAÑOL, I. Avaliação do desempenho do sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no tratamento de efluentes provenientes do processo de tratamento térmico de emulsões de água e óleo. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 169-180, 2009. ([doi:10.4136/ambi-agua.110](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.110))

---

ANDREOZZI, R.; CAPRIO, V.; INSOLA, A.; MAROTTA, R. Advanced Oxidation Process (AOP) for Water Purification and Recovery. **Catalysis Today**, v. 53, p.51-59, 1999.

AMERICA PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard methods for examination of water and wastewater**. 19. ed. Washington: APHA, 1995.

ARSLAN, I.; BALCIOGLU, I.A.; TUHKANEN, T.; BAHNEMANN, D.; H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV and Fe<sup>2+</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV-c versus TiO<sub>2</sub>/UV-A treatment for reactive dye wastewater. **Journal of Environmental Engineering**, v. 126, p. 903-911, 2000.

BELTRÁN, F. J.; GONÇALES, M.; GOANZÁLES, J. F. Industrial waterwater advanced oxidation. Part 1. UV radiation in the presence and absence of hydrogen peroxide. **Water Research**, v. 31, n.10, p. 2405-2414, 1997.

BRAUN, A. M.; OLIVEROS, E. How to evaluate photochemical methods for water treatment. **Water Science and Technology**, v. 35, p. 17–23, 1997.

CARETTI, C.; LUBELLO, C. Wastewater disinfection with PAA and UV combined treatment: a pilot plant study. **Water Reserch**, v. 37, p. 2365-2371, 2003.

CATER, S. R.; STEFAN, M. I.; BOLTON, J. R.; SAFARZADEH-AMIR, A. UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> treatment of methyl tert-butyl ether in contaminated water. **Environ. Sci. Technol.**, v. 34, p. 659-662, 2000.

CAVICCHIOLI, A.; GUTZ, I. G. R. O uso de radiação ultravioleta para o pré-tratamento de amostras em análises inorgânicas. **Química Nova**, v. 26, p. 913-921, 2003.

EINSCHLAG, F. S. G.; LOPEZ, J.; CARLOS, L.; CAPPARELLI, A. L.; BRAUN, A. M.; OLIVEROS, E. Evaluation of the efficiency of photodegradation on Nitroaromatics applying the UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> technique. **Environ. Sci. Technol.**, v. 36, p. 3936-3944, 2002.

GLAZE, W. H.; KANG, J. W.; CHAPIN, D. H. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. **Ozone Sci. Eng.**, v. 9, p. 335-352, 1987.

INCE, N. H.; TEZCANLI, G. Treatability of textile dye-bath effluents by advanced oxidation: preparation for reuse. **Wat. Sci. Tech.**, v. 40, p. 183-190, 1999.

JUANG, L-C.; TSENG, D-H.; YANG, S-C. Treatment of petrochemical wastewater by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> photodecomposed system. **Wat. Sci. Tech.**, v. 36, p. 357-365, 1997.

LIRA, D. C. B.; NASCIMENTO, L.; WILL, I. B. S.; CHIAVONE-FILHO, O.; GUARDANI, R.; NASCIMENTO, C. A. O. Fotodegradação em sistema contínuo de um efluente industrial contendo polímeros visando reúso. **Revista Petro & Química**, n. 281, p. 71-77, 2006.

LITTER, M. I. Introduction to Photochemical Advanced Oxidation Processes for Water Treatment. **Hdb Env. Chem.**, v. 2, p. 325–366, 2005.

STEFAN, M. I.; BOLTON, J. R. Mechanism of degradation of 1,4-dioxane in dilute aqueous solution using the UV/hydrogen peroxide process. **Environ. Sci. Technol.**, v. 32, p. 1588-1595, 1998.

STEPNOWISKI, P.; SIEDLECKA, E. M.; BEHREND, P.; JASTORF, B. Enhanced photodegradation of contaminants in petroleum refinery wastewater. **Water Research**, v. 36, p. 2167-2172, 2002.

SUBTIL, E. L.; MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. Avaliação do desempenho do sistema UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> no tratamento de efluentes provenientes do processo de tratamento térmico de emulsões de água e óleo. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 4, n. 3, p. 169-180, 2009. ([doi:10.4136/ambi-agua.110](https://doi.org/10.4136/ambi-agua.110))

---

SUNDSTROM, D. W.; WEIR, B. A.; KLEI, H. E. Destruction of aromatic pollutants by UV light catalyzed oxidation with hydrogen peroxide. **Environ. Progress**, v. 8, p. 6-11, 1989.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY -USEPA. **Handbook of Advanced Photochemical Oxidation Processes**. EPA/625/R-98/004. Washington, DC: Government Printing Office, 1998.

VOGELPOHL, A.; KIM, S-M. Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. **Jour. Ind. Chem.**, v. 10, p. 33-40, 2004.

XU, B.; GAO, N. Y.; SUN, X. F.; XIA, S. J.; RUI, M.; SIMONNOT, M. O.; CAUSSERAND, C.; ZHAO, J. F. Photochemical degradation of diethyl phthalate with UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. **Jour. Hazard. Mater.**, v. 139, p. 132–139, 2007.

XU, B.; GAO, N. Y.; CHENG, H.; XIA, S. J.; RUI, M.; ZHAO, D. Oxidative degradation of dimethyl phthalate (DMP) by UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process. **Jour. Hazard. Mater.**, v. 162, p. 954-959, 2009.

WANG, S. M.; HUANG, Q. Z.; WANG, Q. S. Study on the synergetic degradation of chitosan with ultraviolet light and hydrogen peroxide. **Carbohydrate Research**, v. 340, p. 1143–1147, 2005.