

**Scientia Forestalis, volume 44, n. 112
p.937-945, dezembro de 2016**

Pós-tratamento de efluente de indústria de papel e celulose empregando membranas de microfiltração e ultrafiltração combinadas com o processo foto-fenton

Post-treatment of effluent from the pulp and paper industry using microfiltration and ultrafiltration membranes combined with the photo-fenton process

Karen Sayuri Ito Sakurai¹
Ludmila Carvalho Neves²
Jeanette Beber de Souza³
Carlos Magno de Sousa Vidal³
Kely Viviane de Souza³

¹Mestranda em Hidráulica e Saneamento. USP – Universidade de São Paulo / EESC – Escola de Engenharia de São Carlos. Av. Trabalhador São Carlense, 400 – 13.566-590 – São Carlos, SP, Brasil. E-mail: sayurisakurai_30@hotmail.com.

²Doutoranda em Ciências Florestais. UNICENTRO - Universidade Estadual do Centro Oeste do Paraná. PR 153 KM 07 – 84.500-000 – Irati, PR, Brasil. E-mail: ludmilaneves@hotmail.com.

³Professor(a) Associado(a) do Departamento de Engenharia Ambiental. UNICENTRO - Universidade Estadual do Centro Oeste do Paraná. PR 153 KM 07 – 84.500-000 – Irati, PR, Brasil. E-mail: jeanettebeber@yahoo.com.br; cacavidal@yahoo.com.br; kelyvdesouza@gmail.com.

Recebido em 20/06/2015 - Aceito para publicação em 09/05/2016

Resumo

As indústrias de papel e celulose geram efluentes com elevado potencial poluidor, destacando-se a carga orgânica e a cor, que não são eficientemente removidas nos tratamentos biológicos convencionais. O presente trabalho teve como objetivo o pós-tratamento do efluente de uma indústria de papel e celulose utilizando membranas filtrantes de microfiltração e ultrafiltração conjugado ao processo oxidativo avançado do tipo foto-Fenton. Foram realizados ensaios de tratabilidade de efluente de uma indústria de papel e celulose em uma unidade piloto de membranas de microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF) e, na sequência, o processo oxidativo avançado (POA) foto-Fenton. Analisou-se nesta pesquisa a remoção de turbidez, DQO e cor. Com os resultados obtidos verificou-se que a UF apresentou melhor eficiência na remoção de cor e DQO, e para os dois tratamentos empregados, a remoção de turbidez foi semelhante, alcançando mais de 99% de eficiência. Tanto a MF quanto a UF proporcionaram resultados muito promissores para a remoção dos parâmetros avaliados. O processo foto-Fenton se mostrou como ótima alternativa ao tratamento complementar dos permeados da MF e UF, alcançando no tratamento da MF+POA uma remoção de 99,04%, 95,97% e 96,43% para a turbidez, DQO e cor verdadeira respectivamente e de 99,90%, 82,58% e 99,49% para a UF+POA.

Palavras-chave: efluente de indústria de papel e celulose, microfiltração, ultrafiltração, processo de separação por membranas, processo oxidativo avançado, foto-Fenton.

Abstract

The pulp and paper industries generate waste-water with high polluting potential especially for the organic load and color, which are not efficiently removed in conventional biological treatments. The present work used at post-treatment of effluent from a pulp and paper industry using ultrafiltration and microfiltration membranes filters coupled with the advanced oxidative process named Photo Fenton. Treatability tests of effluent from a pulp and paper industry at a pilot plant of microfiltration (MF) and ultrafiltration (UF) membranes were made followed by the advanced oxidation process (AOP) Photo Fenton. The removal of turbidity, COD and color were determined. It was found that the UF removal efficiency was better for color and COD; the two treatments used to remove turbidity were similar, reaching over 99% efficiency. Both the MF as UF gave very promising results for the removal of the studied parameters. The PhotoFenton process proved to be a good alternative to the complementary treatment of MF and UF permeate; reaching the treatment of MF + POA with a removal of 99.04%, 95.97% and 96.43% for turbidity; COD and true color respectively; and 99.90%, 82.58% and 99.49% for UF + POA.

Keywords: effluent from pulp and paper industry, microfiltration, ultrafiltration, membrane separation process, advanced oxidation process, photo-Fenton.

INTRODUÇÃO

As indústrias de papel e celulose (IPC) constituem um segmento de grande importância tanto para a economia mundial quanto brasileira. No Brasil, esse segmento industrial está em crescente ascensão e suas exportações contribuem significativamente para o PIB nacional.

O desenvolvimento da indústria de papel e celulose tem uma história importante no Brasil, o País conquistou o mercado internacional pela sua tecnologia silvicultural bem desenvolvida, por suas dimensões territoriais e pelas suas características de clima e de solo. Esse segmento industrial é um dos mais competitivos do País, o padrão de qualidade é equivalente a um dos melhores do mundo e o mercado é globalizado e fortemente ativo. A maioria da produção de papel vem da celulose de fibras curtas, obtida de madeiras plantadas originadas das áreas de reflorestamento (eucaliptos ou pinus) (CETESB, 2008).

Segundo a BRACELPA (2014) o Brasil contribui consideravelmente no mercado mundial de papel e celulose ocupando, em 2012, o 4º lugar como produtor mundial de celulose e o 9º lugar na produção mundial de papel, sendo o maior produtor de celulose de fibras curtas do mundo. O País possui quase 7,7 milhões de hectares de áreas de florestas plantadas, equivalendo a 0,8% de sua área total. A produção brasileira de papel cresce em média 5,4 % ao ano e de celulose 7,1% ao ano. Ainda, as IPC empregam 128 mil trabalhadores diretos (79 mil nas indústrias de 51 mil nas florestas) e 640 mil empregos indiretos.

Em contrapartida aos consideráveis benefícios econômicos a indústria de papel e celulose é responsabilizada pela emissão de poluentes nos estados sólido, líquido e gasoso e, nesse sentido, vem buscando, atualmente, além do crescimento em produtividade e competitividade, também o desenvolvimento nas questões ambientais, com destaque para os efluentes líquidos gerados nos processos produtivos, que, devido ao elevado volume e características altamente poluentes, se lançados sem o devido tratamento, podem prejudicar severamente a qualidade do corpo d'água receptor (CETESB, 2008).

As IPC são responsabilizadas por utilizarem grande quantidade de água em seus processos produtivos, cujos valores típicos oscilam entre 20–40 m³ de efluente gerados por tonelada de polpa produzida [IPCC (2001) *apud* AMARAL (2013)], além disso, geram efluentes com elevada demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos suspensos, temperatura, cor, além de poluentes como compostos organoclorados, lignina, metais pesados, resinas, entre outros (CETESB, 2008). Tudo isso leva a uma grande preocupação com a poluição dos corpos hídricos provocadas pelo lançamento desses efluentes, quando indevidamente tratados.

Dentre as diferentes tecnologias disponíveis para serem aplicadas no tratamento de efluentes de indústrias de papel e de celulose, têm recebido grande destaque no cenário internacional e nacional, os sistemas de membranas filtrantes que têm permitido alcançar resultados promissores no tratamento destes tipos de efluentes.

Segundo Glutek et al. (1995) as membranas consistem em barreiras seletivas nas quais diversos elementos são separados por tamanho ou por diferença de composição química, através dos poros, limitando a passagem de um componente e permitindo a passagem de outro, impulsionados por uma força motriz que pode ser pela diferença de pressão, de potencial elétrico, de concentração a depender do tipo de processo empregado.

A filtração em membranas está sendo constantemente aprimorada e com as melhorias obtidas na fabricação das mesmas e na operação destes sistemas, essa tecnologia vem se tornando cada vez mais atraente e está sendo largamente utilizada em vários tipos de indústrias, incluindo as indústrias de papel e celulose, devido, entre outros fatores, à elevada capacidade de retenção de poluentes, acarretando em efluente final de excelente qualidade, o que pode possibilitar o chamado “fechamento do circuito de água”. Outro fator interessante é que estes sistemas demandam baixo requisito de área e são de fácil automação e operação. Outra grande vantagem é que são modulares e flexíveis à alteração de escala.

Além disso, com o contínuo incremento da produção de membranas filtrantes, inclusive nacional, seu uso já é técnica considerada economicamente viável. Segundo Oliveira (2007) o processo de separação por membranas permite a recirculação de água de processo, pois, na separação não há regeneração dos elementos ou qualquer mudança de fase, além de ter uma ampla especificidade na separação, seja pelo tamanho de sua molécula ou pelo comportamento físico-químico dos elementos envolvidos, sendo assim considerado um processo de produção mais limpa.

Entretanto, apesar dos vários aspectos positivos, essa tecnologia quando aplicada ao tratamento de efluentes apresentam algumas limitações, como a obrigatoriedade de pré-tratamento do efluente bruto, a necessidade de tratamento do concentrado gerado (lodo) e a queda do fluxo do permeado com o tempo provocado pela colmatação das membranas, o que pode requerer a substituição das membranas a cada 5 anos (RIBEIRO, 2012).

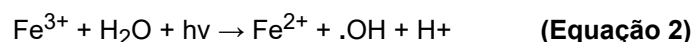
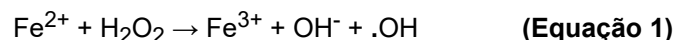
A colmatação das membranas resulta em uma contínua redução do fluxo até um ponto em que o fluxo de permeado se torna independente do gradiente de pressão aplicado (FIELD et al., 1995; HOWELL, 1995).

Essa colmatação é considerada um fator limitante do processo e no caso do tratamento de efluentes de indústrias de papel e celulose é algo praticamente inevitável (AMARAL et al., 2013).

Todavia, existem muitas formas de minimizar esse problema durante a operação, como por exemplo, por retrolavagem das membranas com o próprio permeado (filtrado) produzido e limpezas químicas periódicas (SILVA, 2000).

Outra alternativa para o tratamento de águas residuárias são os Processos Oxidativos Avançados (POA), mais usualmente empregados como complementares às técnicas mais usuais de tratamento. Os POA, Fenton e foto-Fenton, segundo Lucas et al. (2012), são conhecidos pela sua capacidade de mineralizar grande variedade de compostos orgânicos e pela sua eficácia no tratamento de efluentes com elevado teor de polifenóis como o das IPC. O foto-fenton é considerado o mais promissor entre os POA para o tratamento de compostos orgânicos recalcitrantes em soluções aquosas (POURAN et al., 2015), pois utiliza os raios UV, que podem ser obtidos pela radiação artificial ou também pela radiação solar, reduzindo, nesse último caso, os custos de processamento e tornando o processo mais acessível.

De acordo com PÉREZ et al. (2002) na reação Fenton os radicais hidroxila .OH são produzidos pela interação do H₂O₂ com os íons ferrosos em meio ácido como mostra a Equação 1. A taxa de degradação dos poluentes orgânicos por processo Fenton pode ser aumentada quando há a presença de uma fonte de irradiação, chamado de processo foto-Fenton. Esse efeito positivo é devido à foto-redução do Fe (III) a Fe (II), produzindo novos radicais hidroxilas e regenerando o Fe (II), que ainda podem reagir com mais moléculas de H₂O₂ como na Equação 2.



Um fator muito importante na eficiência desses dois processos é o pH do meio, uma vez que valores de pH acima de 3,0 fazem com que haja a precipitação do Fe(III) em hidróxido insolúvel e abaixo de 2,5 pode ocorrer o sequestro dos radicais hidroxila pelas altas concentrações de H⁺ (MELO et al., 2009).

Apesar da eficácia em utilizar a radiação UV, o processo foto-Fenton no tratamento de efluentes, além de depender do pH, também depende das concentrações iniciais de H₂O₂ e Fe(II) e da temperatura (XU et al., 2007).

Em busca de aprimorar a qualidade de efluente final gerado em uma estação de tratamento de efluente (ETE) de uma indústria de papel e celulose, o presente trabalho teve como objetivo o pós-tratamento desse efluente utilizando membranas filtrantes de microfiltração e ultrafiltração conjugadas ao processo oxidativo avançado do tipo foto-Fenton.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram realizados ensaios de tratabilidade de efluente de uma indústria de papel e celulose empregando membranas de microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF) e, na sequência, o processo oxidativo avançado foto-Fenton.

O efluente empregado na pesquisa foi cedido por uma indústria de papel e celulose de grande porte do Estado do Paraná, que, por motivos de sigilo empresarial, não será nominada. Ressalta-se, entretanto, que essa indústria emprega processo biológico de tratamento e sua ETE é composta, em sequência, por: calha parshall, grade, desarenador, decantador primário, reator biológico aerado de crescimento aderido, tanque de aeração e decantador secundário.

A amostra de efluente foi coletada na saída do decantador secundário da ETE, sendo este denominado a partir de agora como efluente secundário.

Os experimentos foram realizados em temperatura ambiente e a caracterização inicial do efluente consistiu das seguintes análises físico-químicas: cor verdadeira, cor aparente, turbidez, sólidos totais, sólidos suspensos totais, pH, DQO e acompanhamento espectrofotométrico na região UV-VIS na faixa de comprimento de onda de 200 a 750 nm. Todos os procedimentos metodológicos seguiram as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012).

Os ensaios de tratabilidade foram realizados na unidade piloto de MF e UF com equipamento de bancada, em escala laboratorial, adquirido da PAM Membranas Seletivas Ltda. O equipamento utiliza o princípio de filtração tangencial e o sentido de filtração é de fora para dentro das fibras.

As membranas de MF e UF constituem-se no formato de fibras ocas e suas principais características estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Características dos módulos de MF e UF utilizados nos testes.

Table 1. Characteristics of MF and UF modules used in the tests.

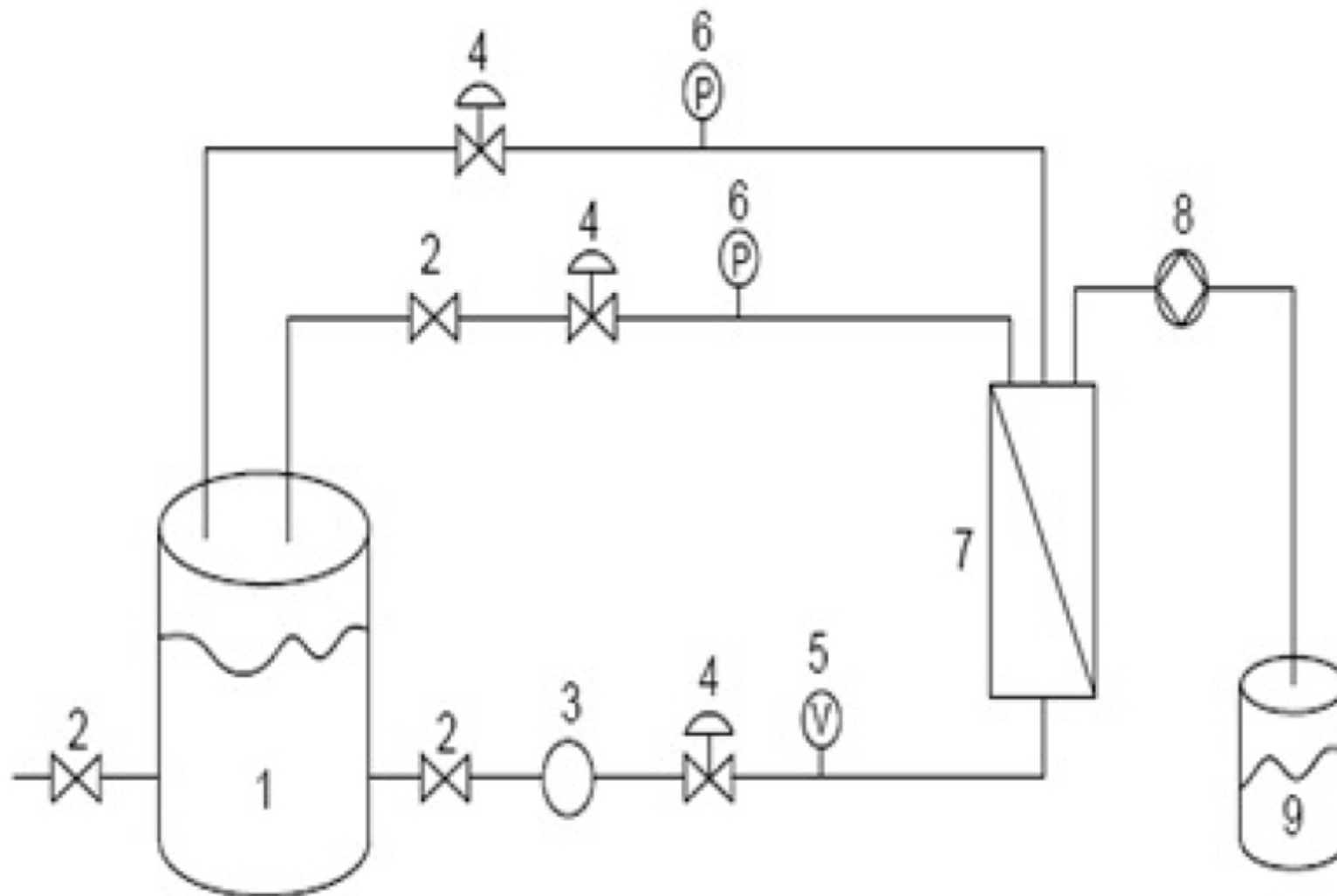
Propriedades	Microfiltração	Ultrafiltração
Material das membranas	Poli (éter imida)	Poli (éter sulfona)
Comprimento da fibra (cm)	26	26
Diâmetro de fibra (mm)	25	25
Tamanho médio dos poros	0,4 µm	50 kDa
Área de filtração (m ²)	0,090	0,090

O tempo de operação no sistema de membranas filtrantes foi de 120 minutos com cada uma das membranas que foram submetidas às seguintes condições operacionais, escolhidas tendo por base os estudos de Neves (2014): número de Reynolds de 2043, pressão de 0,75 bar, vazão de alimentação de 2,4 L/min e frequência de retrolavagem a cada 10 minutos, com pulso de duração de 30 segundos.

Após as filtrações nas duas membranas, foram verificadas as eficiências de remoção dos parâmetros: cor, DQO e turbidez. Nessa mesma etapa foram analisados os perfis de fluxo de permeado durante 120 minutos de operação com cada membrana (MF e UF). O fluxo foi obtido a partir da vazão do permeado empregando-se cronômetro e pipeta com capacidade de 10 mL e convertendo-se para unidade de fluxo $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ dividindo-se a vazão do permeado pela área filtrante da membrana.

Na Figura 1 é apresentada a unidade piloto de MF e UF utilizada nos experimentos.





1-Reservatório de efluente
2-Válvula
3-Bomba diafragma
4-Válvula solenoide

6-Medidor de pressão
7-Módulo de MF/UF
8-Bomba dosadora
9-Reservatório de água

Figura 1. Unidade piloto de MF e UF utilizada nos experimentos. Fonte: Neves (2014)

Figure 1. Pilot unit of MF and UF used in the experiments. Source: Neves (2014)

Em etapa posterior da pesquisa, os permeados das membranas de MF e UF foram submetidos ao processo foto-Fenton com 180 minutos de irradiação em luz UV. O reator fotoquímico utilizado foi confeccionado em borossilicato, com 300 mL de capacidade, equipado com refrigeração por meio de água e sistema de agitação magnética com irradiação proporcionada por uma lâmpada de vapor de mercúrio de 125 W, inserida na solução com auxílio de um bulbo de quartzo. Para o processo foto-Fenton abaixou-se o pH do efluente para valores entre 2 e 3 e empregou-se H₂O₂ 200 mg/L e Fe (II) 15 mg/L. O peróxido de hidrogênio foi monitorado durante todo o processo e à medida em que era consumido era feita sua reposição.

Na Figura 2 é apresentada a fotografia do reator utilizado no processo foto-Fenton nos experimentos.

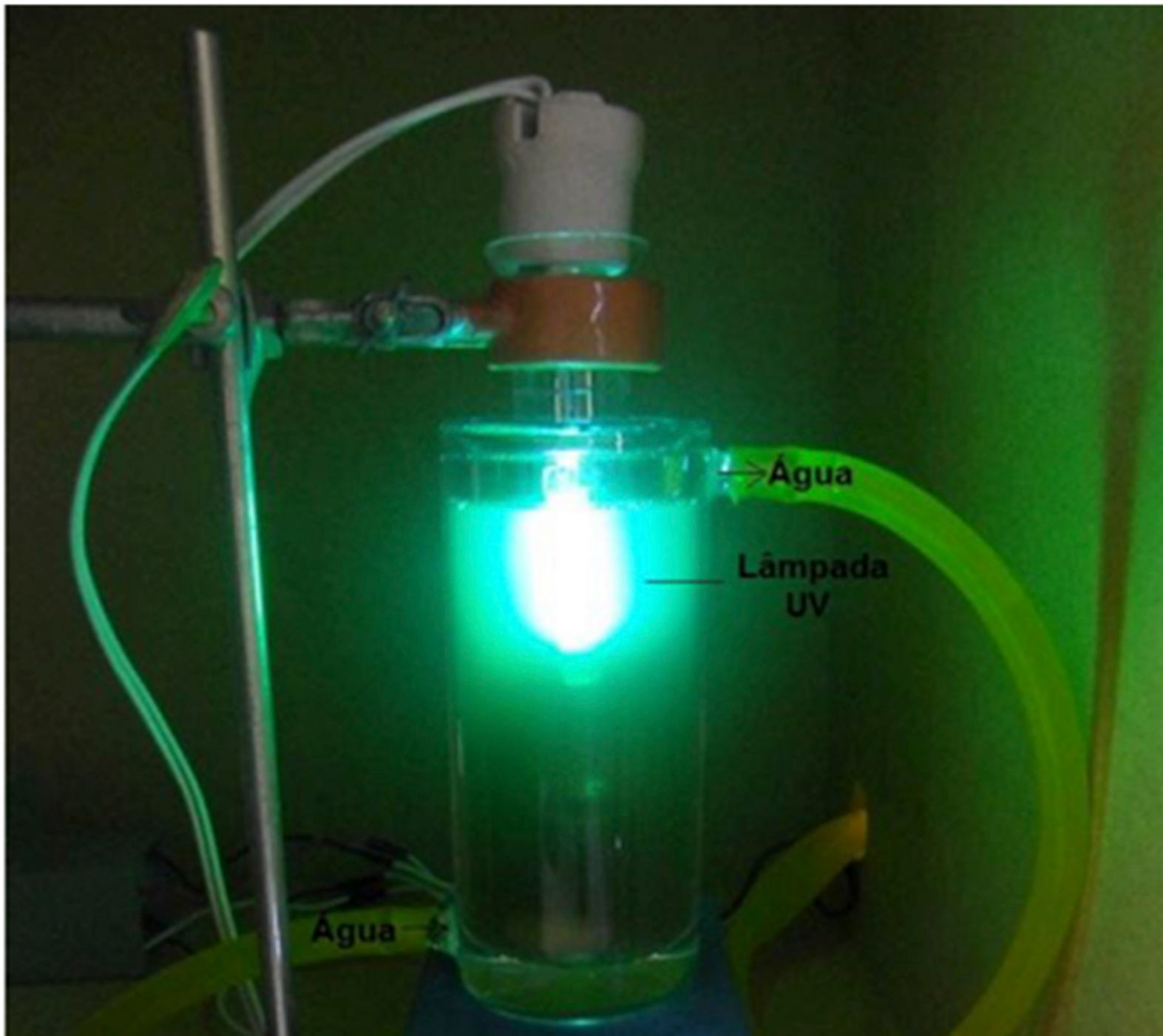




Figura 2. Fotografia do reator foto-Fenton utilizado nos experimentos.

Figure 2. Photograph of photo-Fenton reactor used in the experiments.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da caracterização físico-química do efluente final da ETE da IPC utilizado na pesquisa são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização físico-química do efluente final da ETE da IPC.

Table 2. Physico chemical characterization of effluents of the WTP IPC.

Parâmetros	Valores obtidos
DQO	620 mg/L
Turbidez	288 uT
Cor Verdadeira	392 uH
Cor Aparente	4290 uH
ST	21272 mg/L
SST	223 mg/L
Temperatura	20 °C
pH	7,64

Observa-se que mesmo após o tratamento na ETE da IPC o efluente final ainda apresenta elevados valores de todos os parâmetros analisados.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos após 120 minutos de operação nas membranas de MF e UF.

Tabela 3. Remoções de turbidez, DQO e cor após as unidades de MF e UF.

Table 3. Removal of turbidity, COD and color after the units of MF and UF.

Parâmetro	Efluente secundário	Permeado da MF	Remoção (%)	Permeado da UF	Remoção (%)
Turbidez	288 uT	0,37 uT	99,87%	1,46 uT	99,49%
DQO	620 mg/L	115 mg/L	81,45%	80 mg/L	87,09%
Cor Verd.	392 uH	215 uH	45,15%	141 uH	64,03%

Para as duas membranas as eficiências de remoção de turbidez foram muito elevadas (mais de 99%) uma vez que as características das faixas de tamanhos médios dos poros das membranas utilizadas possibilitaram a retenção efetiva do material em suspensão presente no efluente, que constituem a turbidez.

A remoção de DQO para ambas as membranas diferiu ligeiramente, obtendo-se remoções de aproximadamente 81 e 87% para MF e UF, respectivamente. As membranas agem como barreiras seletivas, impedindo a passagem de partículas com tamanhos maiores que o tamanho médio de seus poros ao permeado, garantindo assim também elevada eficiência de remoção de DQO, embora concentrações residuais ainda tenham permanecido no efluente, haja vista se tratar de um tipo de efluente com grande parcela de matéria orgânica na fase dissolvida.

Almeida (2002) avaliou o emprego de membranas no tratamento do efluente alcalino do branqueamento da polpa de celulose. Nesse estudo realizaram-se testes com diferentes tipos de membranas e a flotação foi empregada como pré-tratamento para a retirada das fibras. No referido trabalho foi possível alcançar remoção de turbidez entre 59-89% utilizando a membrana de UF com Massa Molecular de Corte (MMC) igual a 5.000 Da e de 92% para UF com MMC igual a 10.000 Da, além de remoção de DQO de 83% para a UF com MMC entre 5.000 e 12.000 Da, observando-se que os processos testados propiciaram melhoria global nas características do efluente.

No presente estudo, em relação à cor verdadeira, que é principalmente provocada por material em estado dissolvido e coloidal nas formas orgânica e inorgânica, a MF removeu aproximadamente 45% enquanto que a UF 64%, demonstrando que a UF foi mais efetiva que a MF para a retenção da fase dissolvida e coloidal do efluente, o que, no caso das indústrias de papel e celulose, é algo importante, uma vez que a lignina que é um dos principais constituintes responsáveis pela coloração elevada do efluente e, apresenta-se na fase dissolvida.

Na Figura 3 é apresentado o comportamento do fluxo de permeado da MF e da UF, ao longo de 120 minutos de operação na unidade piloto experimental.

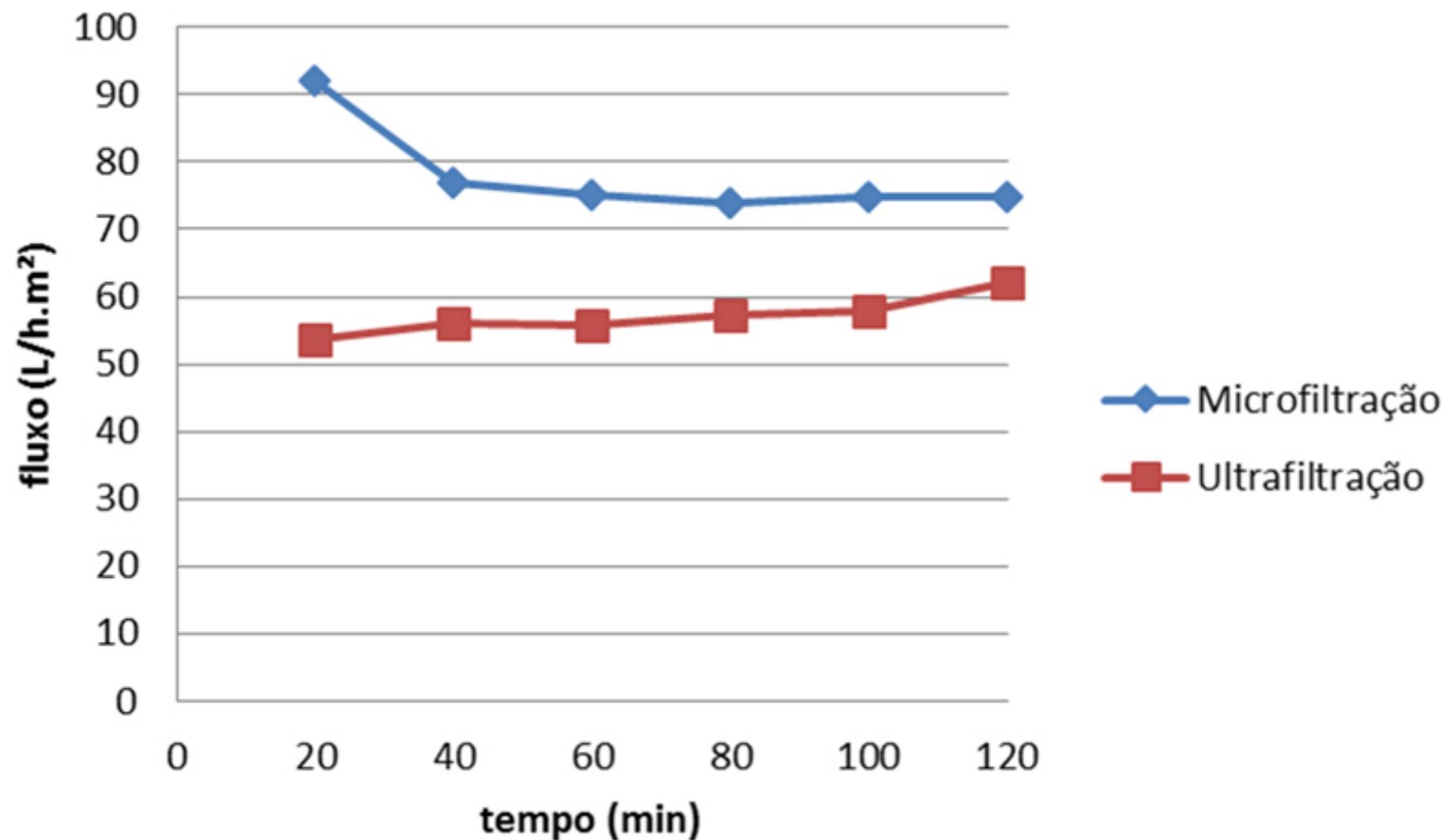


Figura 3. Fluxo dos permeados da MF e UF.

Figure 3. Flux of permeate of MF and UF.

A partir dos dados apresentados na Figura 3 é possível observar que o fluxo de permeado não se manteve constante e tendeu a diminuir para a MF. Essa redução está ligada à deposição de materiais sólidos presentes no efluente na superfície da membrana, levando à formação de torta de filtro que acarreta na incrustação progressiva das membranas.

Já na UF o fluxo tendeu a aumentar, revelando que a retrolavagem foi eficiente na manutenção do fluxo, possibilitando a eliminação das substâncias incrustantes da superfície da membrana o que é bastante favorável ao tratamento, pois quando o fluxo diminui é necessário adicionar-se mais energia ao sistema de compressão, acarretando em maiores custos globais do processo.

De acordo com Amaral et al. (2013) o aumento do fluxo observado pode ser explicado também por um possível aumento da temperatura do efluente durante a recirculação no sistema. O aumento da temperatura resulta na diminuição da viscosidade, o que facilita a passagem do efluente pelos poros da membrana e, conseqüentemente, aumenta o fluxo do permeado.

Vidal e Campos (2003) estudaram o pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio utilizando a filtração tangencial com esgoto sanitário e verificaram, ao longo do tempo de operação, um aumento da temperatura do efluente, pois, no bombeamento do efluente ocorre atrito do fluxo dentro da membrana, produzindo calor e também resultando em aumento da permeabilidade.

Observou-se que os valores de fluxo de permeado para a MF foram superiores aos da UF, uma vez que as membranas de MF possuem poros maiores que as da UF.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados obtidos após 180 minutos de operação no reator foto-Fenton na ocasião em que foi submetido às amostras dos permeados da MF e UF.

Tabela 4. Permeados das membranas de MF e UF após tratamento com o POA foto-Fenton.

Table 4. Permeates of UF and MF membranes after treatment with the AOP photo-Fenton.

Parâmetros	Efluente secundário	Tratamento MF+POA	Remoção (%)	Tratamento UF+POA	Remoção (%)
Turbidez	288 uT	2,75 uT	99,04%	0,29 uT	99,90%
DQO	620 mg/L	25 mg/L	95,97%	108 mg/L	82,58%
Cor Verd	392 uH	14 uH	96,43%	2 uH	99,49%
pH	7,64	2,43	-	2,44	-

Com a associação do processo foto-fenton às membranas obteve-se expressiva melhora nas remoções de DQO e cor do efluente estudado. Em relação à cor, o processo foto-Fenton com o permeado da UF foi mais eficiente do que com o permeado da MF, alcançando-se quase que a descoloração total do efluente. Empregando-se somente as membranas a remoção da cor não foi tão eficiente quando comparado à combinação dos dois processos, assim, indica-se que o processo foto-Fenton possa ser utilizado como um polimento do efluente final dos PSM.

Nas Figuras 4 e 5 estão representados os perfis espectrofotométricos do PSM e POA para MF e UF, respectivamente.

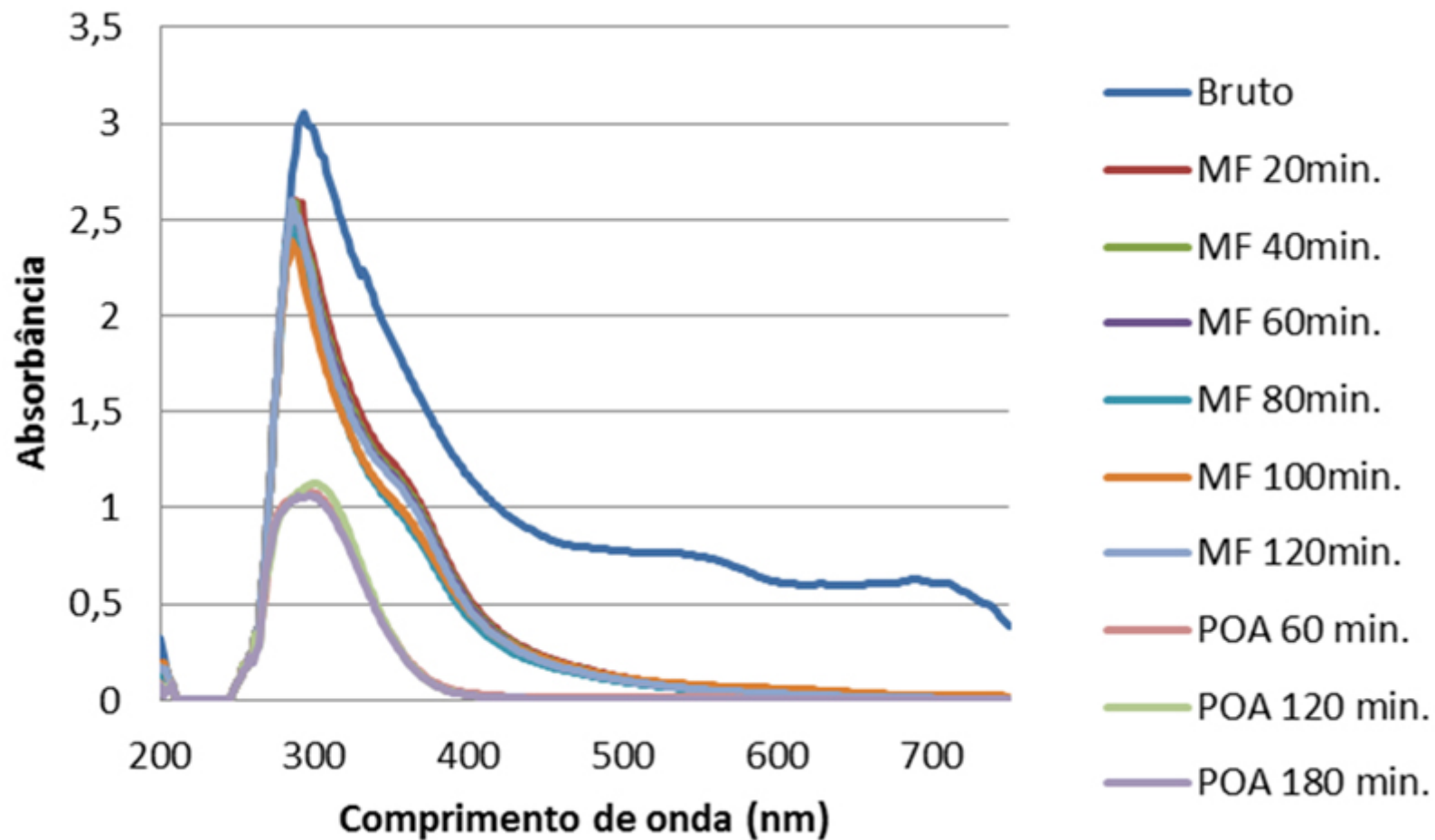
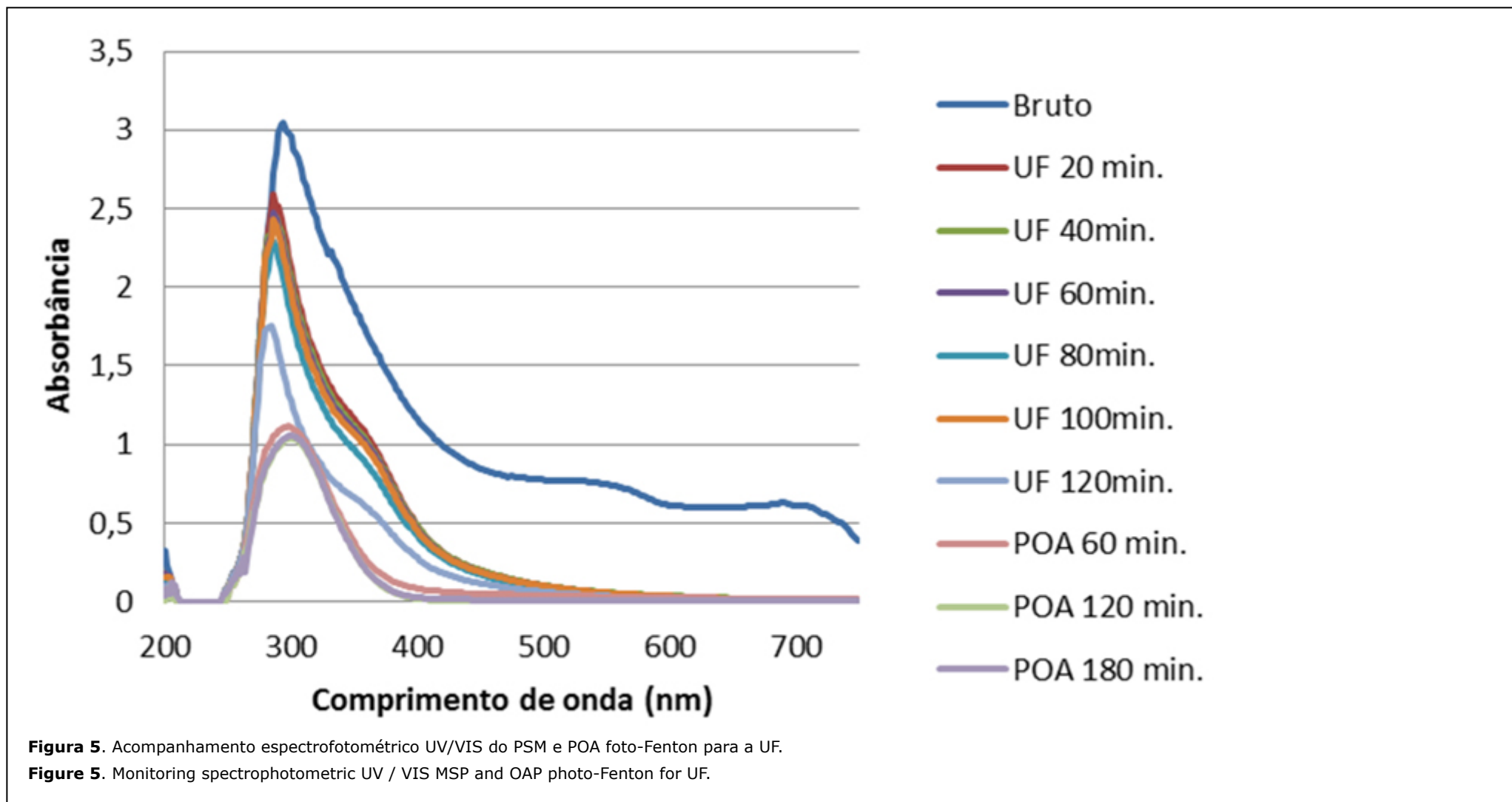


Figura 4. Acompanhamento espectrofotométrico UV/VIS do processo PSM e POA foto-Fenton para a MF.

Figure 4. Monitoring spectrophotometric UV / VIS MSP and OAP photo-Fenton for MF.



Comparando só o PSM, na UF obteve-se uma maior redução do perfil espectrofotométrico no intervalo do comprimento de onda entre 200 e 750 nm no tempo final de 120 minutos em comparação com a MF, mostrando que a UF foi mais eficiente tanto na remoção da cor quanto na remoção de material orgânico. As Figuras 4 e 5 mostraram ainda que, tanto na MF quanto na UF, a redução espectral foi ainda superior quando os PSM foram associados ao POA. A redução da linha espectral na região do visível compreendida entre 350 e 750 nm, em ambos os casos, revelaram uma diminuição praticamente completa da cor, o que pode ser comprovado pelos valores apresentados na Tabela 3. Já o decréscimo da linha espectral na região do UV abaixo de 350 nm indicou uma redução ainda mais pronunciada da matéria orgânica quando os processos foram associados.

CONCLUSÕES

Tendo em vista os excelentes resultados obtidos tanto para MF quanto para UF, comprovou-se a elevada eficiência dessas membranas na remoção dos parâmetros investigados, com destaque para a de UF que proporcionou um incremento ainda maior nas remoções de turbidez, cor e matéria orgânica do efluente estudado.

O processo foto-Fenton pode ser empregado como um processo complementar visando melhorar o desempenho dos PSM e, posteriormente, permitir obtenção de efluente com qualidade compatível com padrões de emissão bastante restritivos, ou ainda para diferentes finalidades de reúso.

Na melhor condição operacional, a MF propiciou remoções de turbidez, DQO e cor de 99,87%, 81,45% e 45,15% e a UF de 99,49%, 87,09% e 64,03%, respectivamente. Já para os tratamentos combinados obteve-se para MF+POA remoção de 99,04%, 95,97% e 96,43% (turbidez, DQO e cor, respectivamente) e para UF+POA de 99,90%, 82,58% e 99,49% (turbidez, DQO e cor, respectivamente).

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária pela concessão de bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, K. M. **Tratamento do efluente alcalino do branqueamento da polpa de celulose pelo processo de separação por membranas**. 2002. 122 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

AMARAL, M. C. S.; ANDRADE, L. H.; LANGE, L. C.; BORGES, C. P. Avaliação do emprego de microfiltração para remoção de fibras do efluente de branqueamento de polpa celulósica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 65-74, 2013.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22.ed. Washington: American Public Health Association, 2012.

BRACELPA – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL, **Relatório anual 2012/2013**. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/rel2012.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2014.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, **Guia técnico ambiental da indústria de papel e celulose – série P + L**. 2008.

FIELD, R. W.; WU, D.; HOWELL, J. A.; GUPTA, B. B. Critical flux concept for microfiltration fouling, **Journal of Membrane Science**, v. 100, n. 3, p. 259-272, 1995.

GLUTEK, B. D.; COTE, P. L.; DEUTSCHMANN, A. **Membrane Technology**. Internal Report, Zenon Environmental Inc, Canadá, 1985

HOWELL, J. Sub-critical flux operation of microfiltration, **Journal of Membrane Science**, v. 107, n. 1-2, p. 165-171, 1995.

LUCAS, M. S.; PERES, J. A.; AMOR, C.; PRIETO-RODRÍGUES, L.; MALDONADO, M. I.; MALARO, S. Tertiary treatment of pulp mill wastewater by solar photo-Fenton. **Journal of Hazardous Materials**, v. 225-226, p. 173-181, 2012.

MELO, S. A.; TROVÓ, A. G.; BAUTITZ, I. R.; NOGUEIRA, R. F. P. Degradação de fármacos residuais por processos oxidativos avançados. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 188-197, 2009.

NEVES, L. C. **Aplicação de microfiltração e ultrafiltração como pós-tratamento de efluente de lodo ativado de uma indústria de papel e celulose**. 2014. 77 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Estadual do Centro Oeste do Paraná, Irati, 2014.

OLIVEIRA, D. R. **Pré-tratamento do processo de osmose inversa utilizando microfiltração e investigação de técnicas de limpeza e recuperação de membranas**. 2007. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

PÉREZ, M.; TORRADES, F.; GARCIA-HORTAL, J. A.; DOMÈNECH, X.; PERAL, J. Removal of organic contaminants in paper pulp treatment effluents under Fenton and photo-Fenton conditions. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 36, n. 1, p. 63-74, 2002.

POURAN, R. S.; AZIZ, A. A. R.; DAUD, W. M. A. Review on the main advances in photo-Fenton oxidation system for recalcitrant wastewaters. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 21, p. 53-69, 2015.

RIBEIRO, T. F. S. **Avaliação da ozonização e O₃/UV seguido de membranas para o reuso de efluentes da indústria do petróleo**. 2012. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SILVA, C. M.; REEVE, D. W.; HUSAIN, H.; RABIE, H. R.; WOODHOUSE, K. A. Model for flux prediction in high-shear microfiltration systems. **Journal of Membrane Science**. v. 173, n. 1, p. 87-98, 2000.

VIDAL, C. M. S.; CAMPOS, J. R. Pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio de leito expandido alimentado com esgoto sanitário utilizando sistema de microfiltração tangencial. In: CONGRESSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22, Joinville, 2003, **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2003.

XU, M.; WANG, Q.; HAO, Y. Removal of organic carbon from wastepaper pulp effluent by lab-scale solar photo-Fenton process. **Journal of Hazardous Materials** v. 148, n. 1-2, p. 103-109, 2007.