

II-545 - AVALIAÇÃO DE NANOFILTRAÇÃO E PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO PARA PÓS-TRATAMENTO E REÚSO DE EFLUENTE TÊXTIL

Gabriel Carmo Moreira⁽¹⁾

Estudante de Engenharia Química na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas).

Alessandra Paula Braga Araújo⁽²⁾

Estudante de Engenharia Química na PUC Minas.

Bárbara Teodoro de Oliveira⁽³⁾

Estudante de Engenharia Química na PUC Minas.

Lucas Moraes de Oliveira⁽⁴⁾

Engenheiro Químico pela PUC Minas.

Laura Hamdan de Andrade⁽⁵⁾

Engenharia Química pela Universidade Federal de Minas Gerais. Mestre e Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMG).

Endereço⁽¹⁾: Rua Ajair de Almeida Costa, 559 - Mantiqueira - Belo Horizonte - MG - CEP: 31660-280 - Brasil – Tel: +55 (31) 3453-0366 - e-mail: gabrielcarmomoreira@gmail.com

RESUMO

A escassez dos recursos naturais tem levado a leis ambientais cada vez mais severas, por conseguinte, os gastos relacionados com tratamento de efluentes e de água vêm crescendo no setor industrial. Desse modo, as indústrias estão buscando alternativas que minimizam esses custos e ao mesmo tempo consigam reduzir os impactos ambientais. As indústrias têxteis consomem elevados volumes de água nos seus processos, o que acarreta em um grande volume de efluente líquido. Esses apresentam uma composição complexa e variável possuindo elevadas concentrações de corantes e sais, dentre outros produtos químicos. Sendo assim, tem-se buscado tecnologias alternativas que possibilitam o reúso do efluente tratado na indústria. Neste contexto, o presente trabalho avaliou a conjugação dos processos oxidativos avançados (POA), fotoperoxidação ou foto-oxidação, com a nanofiltração (NF), utilizando ultrafiltração (UF) como pré-tratamento, visando à geração de água de reúso. A resistência à incrustação da membrana, a reversibilidade dessa incrustação, e o fluxo de permeado foram avaliados. O planejamento fatorial foi usado como ferramenta para definir as melhores condições de pressão de filtração e dosagem de peróxido de hidrogênio (H_2O_2). Os resultados mostraram que as três rotas avaliadas obtiveram altas remoções de condutividade, entretanto, a rota composta apenas pelos processos de separação por membranas, sem conjugação com os processos oxidativos avançados, apresentou menor incrustação. Portanto, constata-se que o efluente tratado encontra-se apto para o reúso.

PALAVRAS-CHAVE: Efluente têxtil, Reúso, Fotoperoxidação, Foto-oxidação, Nanofiltração.

INTRODUÇÃO

A indústria têxtil é conhecida como um dos setores industriais com maior geração de efluentes líquidos e pelo uso de variados produtos tóxicos e recalcitrantes que, geralmente, são lançados nos corpos hídricos como constituintes do efluente final (STARLING, 2016). Conforme Vajnhandl e Valh (2014) são utilizados mais de 100 L de água por quilograma de tecido produzido. Porém, esse valor pode ser ainda mais elevado, pois varia conforme a técnica de tingimento empregada, o tipo de tecido e as máquinas utilizadas (STARLING, 2016).

A água é utilizada principalmente nas etapas do processamento úmido dos tecidos. Esta é composta por quatro etapas, sendo elas: preparação, que tem por finalidade remover impurezas do tecido; tingimento, onde ocorre a coloração do tecido à cor desejada; lavagem, que consiste na remoção do excesso de corantes e auxiliares não fixados nas fibras; e o acabamento, que tem como objetivo tomar medidas que acrescentam valor ao tecido (STARLING, 2016).

Considerando o cenário mundial de escassez de água e a elevação no seu preço, cresce a busca por tecnologias eficazes para o tratamento do efluente gerado pela indústria têxtil, que possibilitem o enquadramento do mesmo às exigências de reúso. A reutilização do efluente tratado contribui com a diminuição do volume de água nova captada, o que, por conseguinte, leva à redução dos impactos ambientais e de gastos com captação e

tratamento de água. No entanto, para que o reúso seja viabilizado, é necessário adequar a qualidade do efluente tratado aos padrões de qualidade exigidos pela etapa do processo em que o mesmo será reutilizado (VAJNHANDL; VALH, 2014).

Os métodos convencionais de tratamento aplicados na indústria têxtil normalmente incluem processos físico-químicos seguidos de tratamento biológico. O sistema pode ser considerado eficiente, visto que consegue remover grande parte da matéria orgânica do efluente. Porém, enfrenta problemas como o acúmulo de lodo, o qual não pode ser reaproveitado devido ao elevado teor de corantes adsorvidos (KUNZ et al., 2002). Ademais, este tratamento não enquadra o efluente tratado nas condições de reúso, necessitando de um polimento do efluente final por meio de um pós-tratamento.

Assim, dentre as técnicas que podem ser utilizadas como pós-tratamento, destacam-se os processos oxidativos avançados (POA) e os processos de separação por membranas. Os POAs são considerados alternativas interessantes, pois geram espécies oxidantes não seletivas capazes de degradar até os compostos mais resistentes. Eles surgiram da adaptação dos processos oxidativos convencionais por meio do uso de agentes oxidantes fortes ou pela adição de catalisadores, como o ferro, o magnésio e o dióxido de titânio. Esta alteração promove o surgimento de rotas adicionais de produção de radicais hidroxila ($\dot{O}H$) que, por consequência, favorece a eficiência na degradação dos contaminantes (SANTOS et al., 2007). Além disso, a exposição à luz artificial ou solar (UV ou UV-Vis) é um fator que também gera novas rotas de produção dos radicais oxidantes (MALATO et al., 2009).

O uso dos processos oxidativos avançados apresentam algumas vantagens, como em condições ideais promovem a mineralização da matéria orgânica, o que, os diferem, de outros processos em que ocorre apenas a mudança de fase dos poluentes (BRILLAS et al., 2009). Outrossim, é uma técnica versátil, uma vez que diferentes sistemas podem ser usados para a formação de $\dot{O}H$, o que permite escolher o sistema que melhor se ajusta ao efluente a ser tratado considerando a eficiência de degradação dos compostos e custos operacionais (Villar et al., 2011). Entretanto, também possuem desvantagens, como a presença de alguns poluentes podem reduzir a reatividade do POA, tendo em vista que podem sequestrar radicais hidroxila ou até impedir a produção dos mesmos. Além disso, a degradação dos poluentes pode ser parcial, possibilitando a formação de intermediários tóxicos ou com toxicidade maior do que o poluente de origem (MACHULEK et al., 2007).

Em contrapartida, os processos por separação por membranas são definidos, de um modo geral, como aqueles que empregam uma barreira seletiva que, devido a ação de uma força motriz, promove a separação de determinados componentes em suspensão ou em solução. A força motriz é formada pelo gradiente de potencial químico (expresso em termos de gradiente de pressão ou de concentração) ou elétrico através da membrana (HABERT et al., 2006 apud RICCI, 2015). De acordo com AUONI et al. (2012) os processos de separação por membranas são promissoras como pós-tratamento de efluente têxtil, porque podem ser usados com o objetivo de remover os corantes, recuperar os produtos auxiliares e reutilizá-los, ou gerar uma água apta para reúso.

A ultrafiltração (UF) tem sido empregada para remoção de alguns corantes, por exemplo, o índigo e os corantes diretos, dispersos e reativos. Todavia, a maior atenção vem sendo dada a aplicação da nanofiltração (NF), pois essa possibilita a remoção de corantes reativos que a taxa de fixação no tecido é mais baixa, variando entre 60 e 90 % (AUONI et al., 2012). A NF promove a remoção de componentes orgânicos com peso molecular relativamente baixo, bem como íons bivalentes e íons moleculares que possuem uma massa molecular de 700 a 1000 Da (CHOLLOM et al., 2015).

Desse modo, tendo em vista que a matriz do efluente têxtil é complexa e diversificada, a combinação de processos pode ser uma solução eficaz para alcançar a remoção de diferentes tipos de poluentes. De acordo com Kunz et al. (2002), para efluentes de indústria têxtil o tratamento ideal se baseia na combinação de métodos, visto que os corantes presentes normalmente se mostram resistentes à degradação nos sistemas convencionais de tratamento. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a conjugação de um processo químico (fotoperoxidação ou foto-oxidação) a um físico (ultra e nanofiltração) como pós-tratamento de efluente têxtil previamente tratado por processos convencionais.

OBJETIVO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicação de processos oxidativos avançados (fotoperoxidação ou foto-oxidação) e processos de separação por membranas (ultrafiltração e nanofiltração) para o pós-tratamento de efluente têxtil visando a reutilização da água na própria indústria.

MATERIAS E MÉTODOS

EFLUENTE TÊXTEL

O efluente em estudo é proveniente de uma indústria têxtil localizada no estado de Minas Gerais. A indústria possui uma produção distribuída em tecidos índigos e tricolines, viscose e sarjas, bem como tecidos maquinados, lisos e estampados. O efluente gerado passa pela Estação de Tratamento de Efluente (ETE) localizada dentro da empresa, a qual é constituída por um sistema de tratamento convencional por lodos ativados. O efluente estudado foi coletado na saída da ETE e devidamente caracterizado a partir de parâmetros físico-químicos de acordo com o *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 1999).

PRÉ-TRATAMENTO

O efluente têxtil foi submetido ao processo de ultrafiltração (UF) com o objetivo de remover os sólidos suspensos evitando danos aos sistemas de POA ou NF, tendo em vista que pode reduzir as incrustações e aumentar a vida útil da membrana de NF. O aparato experimental, como apresentado na Figura 1, é constituído por um módulo de membranas submerso no tanque de alimentação, tanque de permeado, bomba de recirculação, válvula, manômetro e controlador de velocidade. O módulo utilizado foi o GE-Zenon ZW-1, com área de filtração de 0,047 m² e diâmetro de poro nominal de 0,04 µm.

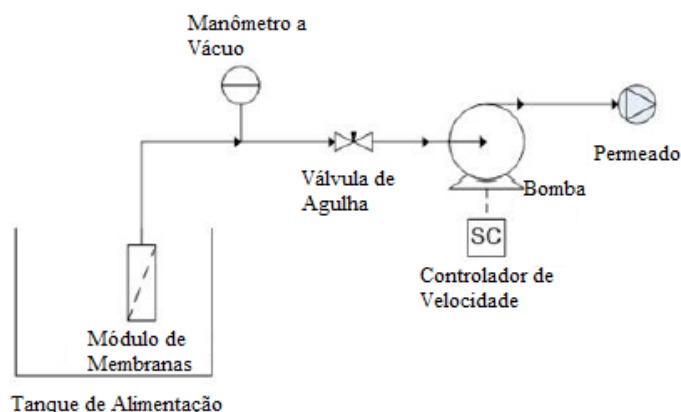


Figura 1: Representação esquemática do sistema de ultrafiltração.

Vale ressaltar que o efluente foi filtrado a pressão constante de 0,5 bar até que 95% da alimentação fosse convertida em permeado (95% taxa de recuperação).

FOTOPEROXIDAÇÃO

O efluente ultrafiltrado, devidamente caracterizado, foi tratado por fotoperoxidação. O aparato experimental empregado para fotoperoxidação, como demonstrado na Figura 2, é constituído por uma lâmpada UV, um béquer com capacidade de 4 L e um *chiller* contendo um sensor de temperatura digital, para recircular água de resfriamento de modo a manter a temperatura do efluente a 25 °C. Para mais, vale ressaltar que a lâmpada UV usada é da marca HOPAR, modelo UV-611 e, possui uma potência de 24 a 36 W. Nestes testes, a dosagem requerida de matéria orgânica (expressa em carbono orgânico total) e peróxido de hidrogênio foi estabelecida conforme o planejamento fatorial. Ademais, foi realizado utilizando 2 L do efluente ultrafiltrado sem correção de pH, com um tempo reacional de 120 minutos.

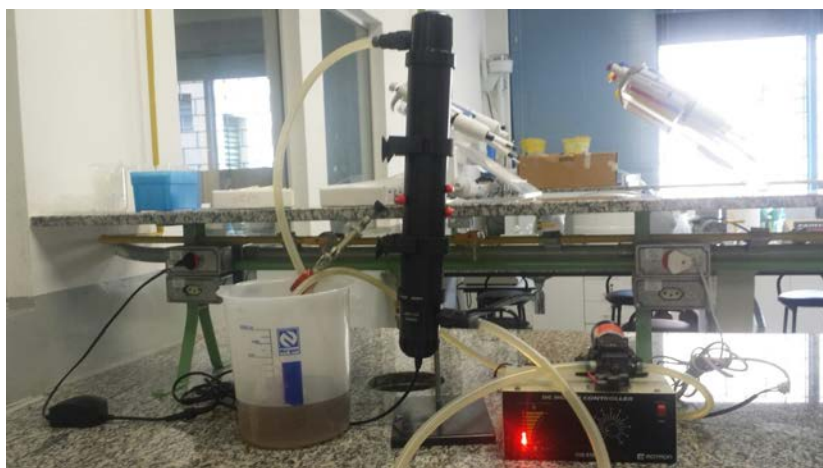


Figura 2: Aparato experimental para realização do processo de fotoperoxidação.

NANOFILTRAÇÃO

Os ensaios de nanofiltração foram realizados na unidade de filtração apresentada pelas Figuras 3 e 4. Como mostrado, essa unidade é composta por tanque de alimentação, manômetro, válvula para ajuste pressão, bomba centrífuga conectada a um controlador de velocidade, medidor de temperatura, rotâmetro para controle de vazão e módulo de aço inox, no qual a membrana foi inserida. A membrana utilizada no teste foi a NF90 da marca DowFilmtec, sendo constituída por um composto poliamida. A área de filtração foi de 0,0064 m².

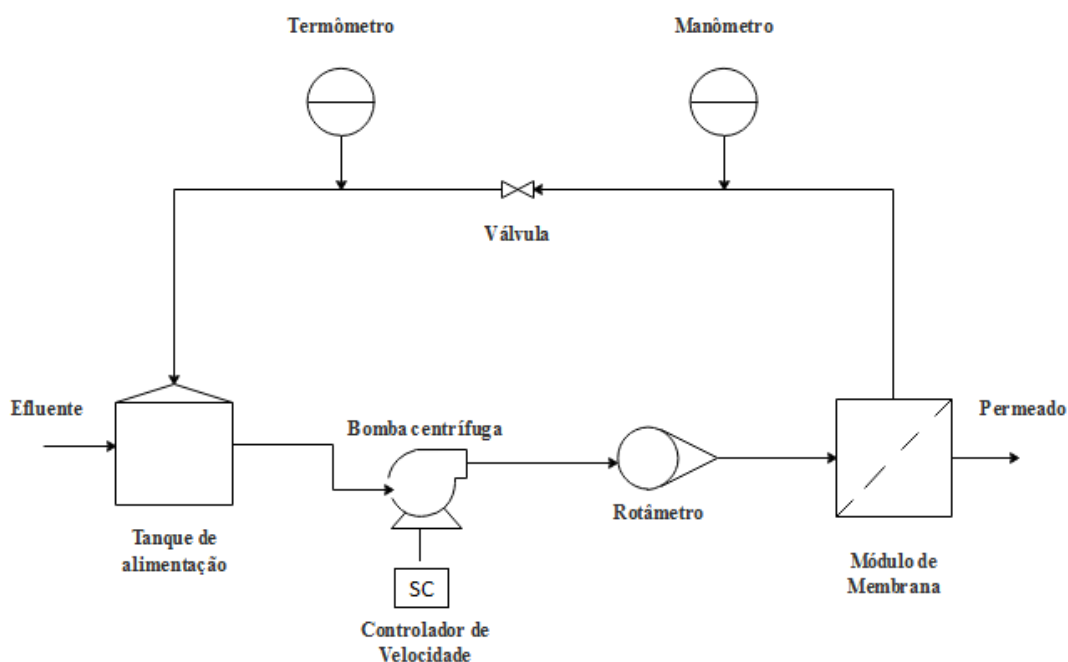


Figura 3: Representação esquemática do sistema de nanofiltração.

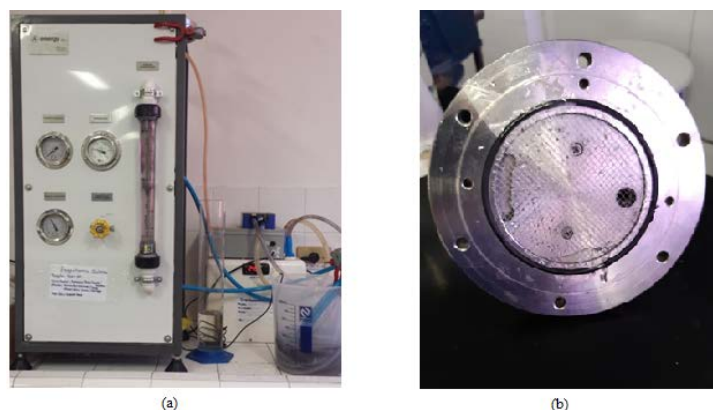


Figura 4: Unidade de filtração empregada no ensaio de nanofiltração: (a) Visão frontal e (b) parte interna do módulo de membrana.

As membranas a serem testadas foram cortadas e adequadamente introduzidas no módulo. Além disso, uma tela foi colocada sobre a membrana para promover a distribuição da alimentação.

A vazão de permeado foi monitorada periodicamente por meio da medição do volume de permeado durante um tempo fixo. O fluxo do permeado para uma dada temperatura foi calculado por meio da equação (1).

$$J(T) = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} \quad \text{equação (1)}$$

Sendo que, $J(T)$ é o fluxo permeado para uma temperatura T , em $L \cdot h^{-1} \cdot m^2$, ΔV é o volume de permeado coletado, em L, Δt é o tempo de coleta, em horas, e A é a área de filtração, em m^2 .

Utilizando a equação (2) os valores obtidos para o fluxo foram corrigidos para 25 °C. Em que, $J(T)$ é o fluxo permeado na temperatura de permeação T , em $L \cdot h^{-1} \cdot m^2$, μ_T é a viscosidade dinâmica da água na temperatura de permeação, em $N \cdot s^{-1} \cdot m^2$, $\mu_{25^\circ C}$ é a viscosidade dinâmica da água a 25 °C, em $N \cdot s^{-1} \cdot m^2$, e $J(25^\circ C)$ é o fluxo permeado corrigido para 25 °C, em $L \cdot h^{-1} \cdot m^2$.

$$J(25^\circ C) = \frac{\mu_T}{\mu_{25^\circ C}} \cdot J(T) \quad \text{equação (2)}$$

COMPACTAÇÃO E DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE HIDRÁULICA

Primeiramente, as membranas foram submetidas ao processo de reumidificação com solução aquosa de álcool (50 %v/v) e o tempo foi determinado levando em consideração o fluxo de permeado. Em seguida, a compactação foi realizada utilizando 2 L de água destilada a uma pressão constante de 10 bar até que fosse verificada a estabilização do fluxo de permeado. Posteriormente, a permeabilidade hidráulica da membrana foi determinada por meio do monitoramento do fluxo permeado nas pressões de 10, 8, 6 e 4 bar. A temperatura do experimento foi mantida entre 22 e 30 °C por meio do *chiller* e inserção de bolsas térmicas no tanque de alimentação. Os valores de fluxo foram corrigidos para 25 °C por meio da equação (2). Vale salientar que a permeabilidade hidráulica, K , refere-se ao coeficiente angular da reta obtida pela regressão linear dos dados do fluxo de permeado em função da pressão aplicada. E a permeabilidade requerida foi entre 3 a 4 $L \cdot h^{-1} \cdot m^2 \cdot bar^{-1}$.

ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

Os ensaios de NF foram realizados com recirculação total, isto é, recirculando o permeado e o concentrado para o tanque de alimentação. Nestes testes, a pressão utilizada foi estabelecida pelo planejamento fatorial. No entanto, em todos os testes foram usados 2 L de alimentação e uma vazão de alimentação de 2,4 $L \cdot min^{-1}$. A temperatura foi mantida entre 22 e 30 °C por meio do *chiller* e inserção de bolsas térmicas no tanque de alimentação. Em intervalos de 10 minutos, foi determinado o fluxo de permeado e a temperatura. O efluente foi nanofiltrado por um tempo mínimo de 60 minutos, parando apenas ao obter três fluxos iguais. Em seguida, coletou-se 250 mL de permeado e foram feitas análises de pH, condutividade e turbidez. Para mais, vale destacar que para cada ensaio utilizou-se uma nova membrana.

PLANEJAMENTO FATORIAL

A fim de obter possíveis combinações entre a fotoperoxidação e a nanofiltração, um planejamento fatorial com três repetições do ponto central e em duplicata foi realizado. Os valores e os números de experimentos encontram-se na tabela 1. Esses totalizaram 20 experimentos, em que (-) representa a pressão de 4 bar e a dosagem de 1:0 mg_{COT}/mg_{H₂O₂}, 0 representa a pressão de 7 bar e a dosagem de 1:0,15 mg_{COT}/mg_{H₂O₂} e, (+) representa a pressão de 10 bar e a dosagem de 1:0,30 mg_{COT}/mg_{H₂O₂}.

Tabela 1: Planejamento fatorial para conjugação de nanofiltração e fotoperoxidação.

Ensaio	Pressão (bar)	Dosagem (mg _{COT} /mg _{H₂O₂})	Ensaio	Pressão (bar)	Dosagem (mg _{COT} /mg _{H₂O₂})
1	+	+	11	-	0
2	+	-	12	0	0
3	-	+	13	+	+
4	-	-	14	+	-
5	0	0	15	-	+
6	0	0	16	-	-
7	0	0	17	+	0
8	+	0	18	-	0
9	0	-	19	0	+
10	0	+	20	0	-

DETERMINAÇÃO E AVALIAÇÃO DO PONTO ÓTIMO

O ponto ótimo foi determinado por meio da curva de superfície gerada que relaciona os fatores independentes, pressão e dosagem de peróxido de hidrogênio, com o fator dependente, remoção de condutividade do sistema. Essa análise foi realizada com auxílio do software *Statistica 10*.

Após a determinação do ponto ótimo, replicou-se a condição ótima nos processos de fotoperoxidação e nanofiltração. Além disso, a pressão ótima foi utilizada para avaliação de outras duas rotas de tratamento: fotoperoxidação UV associada à NF e apenas NF, sem precedência de processos oxidativos. Vale salientar que a fotoperoxidação, isto é, aplicação apenas da radiação UV, foi realizada com o mesmo aparato experimental e condições operacionais usadas para fotoperoxidação e, a filtração foi realizada por um tempo de 120 minutos.

LIMPEZA FÍSICA DA MEMBRANA

As membranas utilizadas na replicação do ponto ótimo foram submetidas à limpeza física com objetivo de remover a incrustação reversível. Esse processo foi realizado por meio da recirculação de 3L de água destilada a uma vazão de 2,4 L.min⁻¹, na ausência de pressão e com o sistema sem recirculação do concentrado. Em seguida, com o sistema com recirculação total, foi recirculado 2 L de água destilada a uma vazão de 2,4 L.min⁻¹ e na ausência de pressão por um período de 30 minutos. Após a limpeza física, a membrana passou pelo processo de compactação e a permeabilidade hidráulica foi determinada.

Por fim, foi avaliada a incrustação das membranas por meio da determinação da resistência. Essas foram calculadas de acordo com ANDRADE (2016) utilizando o conceito de resistências associadas em série. A resistência total (R_{Total}), como descrita na equação (3), compreende no somatório de três componentes: a resistência da membrana ($R_{membrana}$), a resistência à incrustação reversível ($R_{reversível}$) e a resistência à incrustação irreversível ($R_{irreversível}$). A R_{Total} foi calculada a partir da equação (4).

$$R_{Total} = R_{membrana} + R_{reversível} + R_{irreversível} \quad \text{equação (3)}$$

$$R_{Total} = \frac{\Delta P}{J_{efluente} \cdot \mu_{25^{\circ}\text{C}}} \quad \text{equação (4)}$$

Sendo que, ΔP é a pressão aplicada no teste de NF, em bar, $J_{efluente}$ é o fluxo permeado do efluente a 25 °C, em L.h⁻¹.m², e $\mu_{25^{\circ}\text{C}}$ é a viscosidade dinâmica da água a 25 °C, em N.s⁻¹.m⁻².

A determinação da resistência intrínseca da membrana virgem ($R_{membrana}$) foi realizada de acordo com a equação (5), a qual leva em consideração a permeabilidade hidráulica da membrana.

$$R_{membrana} = \frac{1}{K_{25^{\circ}C} \cdot \mu_{25^{\circ}C}} \quad \text{equação (5)}$$

Sendo que, $K_{25^{\circ}C}$ é a permeabilidade hidráulica da membrana a 25 °C, em $m^3.s^{-1}.m^2.Pa$, e $\mu_{25^{\circ}C}$ é a viscosidade dinâmica da água a 25 °C, em $N.s^{-1}.m^2$.

A resistência à incrustação irreversível ($R_{irreversivel}$) foi calculada conforme a permeabilidade hidráulica da membrana obtida após a limpeza física, demonstrada na equação (6).

$$R_{irreversivel} = \frac{1}{K_{fis} \cdot \mu_{25^{\circ}C}} - R_{membrana} \quad \text{equação (6)}$$

Sendo que, K_{fis} é a permeabilidade hidráulica da membrana determinada após a limpeza física, em $m^3.s^{-1}.m^2.Pa$, e $\mu_{25^{\circ}C}$ é a viscosidade dinâmica da água a 25°C, em $N.s^{-1}.m^2$.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 5 apresenta a superfície de resposta para eficiência de remoção de condutividade em função da dosagem de H_2O_2 e da pressão da NF obtida através do planejamento fatorial. É possível observar que, para os parâmetros analisados, quanto maior os fatores independentes, mais elevado foi a remoção da condutividade. Outrossim, nota-se que para a menor condição analisada no intervalo estudado (4 bar e dosagem de 1:0 $mg_{COT}/mg_{H_2O_2}$) a porcentagem ficou entre 88 e 90%, o que revela que mesmo na ausência do oxidante é possível alcançar uma elevada remoção.

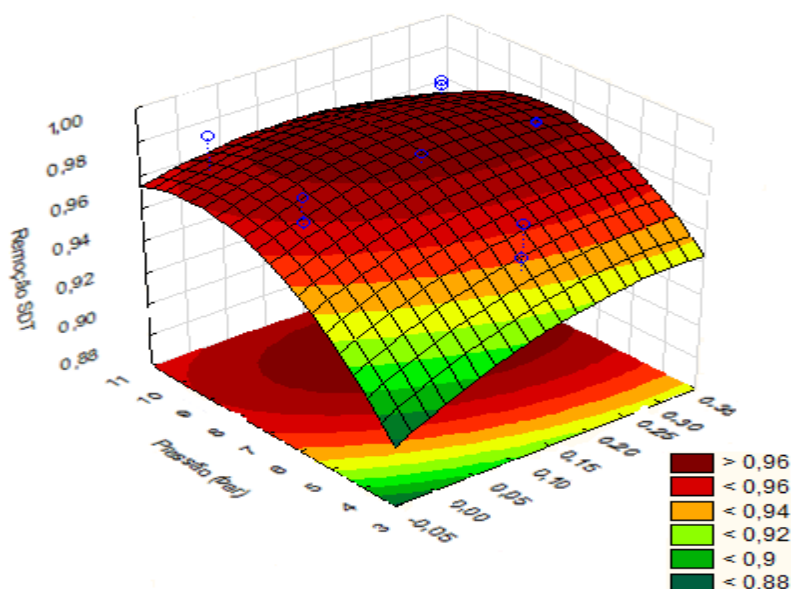


Figura 5: Superfície de resposta de remoção de condutividade em função da pressão aplicada e dosagem de H_2O_2 utilizada.

O ponto ótimo, de máxima eficiência de remoção, foi observado para dosagem de peróxido de 1:0,24 $mg_{COT}/mg_{H_2O_2}$ e pressão de 8,5 bar. Essa pressão ótima foi utilizada para a nanofiltração empregada como pós-tratamento único ou associado à fotoperoxidação ou foto-oxidação. Todos os processos obtiveram elevada eficiência de remoção de condutividade (>97%), como mostrado na tabela 2.

Tabela 2: Condutividade do efluente bruto, ultrafiltrado, após os processos oxidativos avançados e dos permeados obtidos pelas rotas avaliadas.

Amostra	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	Remoção (%)
Efluente Bruto	6420	-
Efluente UF	6130	-
Pós-POA (UF+UV+NF)	24580	-
Pós-POA (UF+POA+NF)	7070	-
Permeado (UF+UV+NF)	115,2	99,5%
Permeado (UF+POA+NF)	140,8	98,0%
Permeado (UF+NF)	157,3	97,4%

Para mais, verifica-se que houve um aumento na condutividade após os processos oxidativos avançados com uma elevação mais expressiva após a foto-oxidação. Esse fenômeno pode ter sido ocasionado pela quebra parcial da matéria orgânica gerando moléculas carregadas e, por consequente, elevando a quantidade de sólidos dissolvidos no efluente. No entanto, nota-se que, em todas as rotas analisadas, houve um decaimento expressivo após a nanofiltração. Isso aconteceu, porque a NF é capaz de reter moléculas com baixo peso molecular, carregadas ou não, além de íons bivalentes e íons moleculares.

A razão entre o fluxo de permeado com efluente e fluxo de permeado com água pura para a membrana nova ($J_{\text{efluente}}/J_{\text{água}}$) em função do tempo de filtração é apresentado na figura 6.

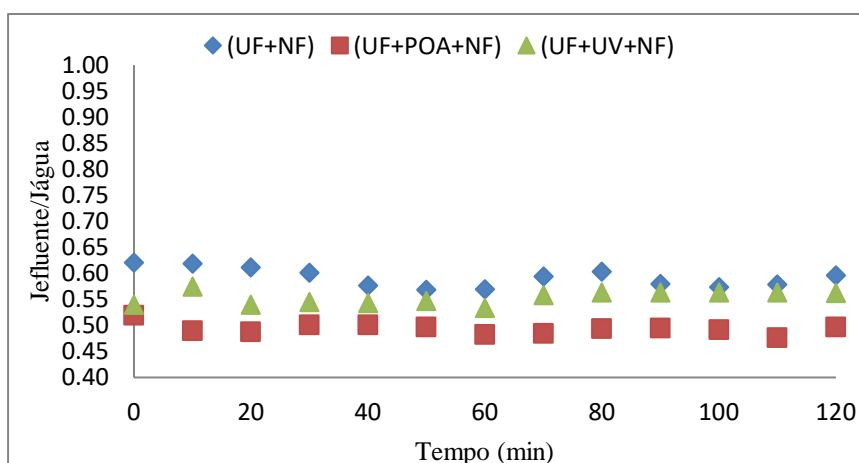


Figura 6: Razão do fluxo de permeado com efluente e com a água, em função do tempo.

Pode-se observar que houve um decaimento no fluxo de permeado quando o efluente foi submetido à radiação UV ou à fotoperoxidação. Esse fenômeno ocorreu possivelmente porque a matéria orgânica foi parcialmente degradada não havendo sua total mineralização, desse modo, quando o efluente foi submetido ao processo de nanofiltração, a presença dessas moléculas menores e em altas concentrações próximas a superfície da membrana gerou uma pressão osmótica. Essa pressão provocou uma diminuição na pressão mecânica e, consequentemente, no fluxo de permeado. Ademais, esse resultado por estar relacionado com a incrustação da membrana também pode ser observado através do cálculo das resistências, apresentado na tabela 3.

Tabela 3: Resistências à incrustação para as rotas avaliadas.

Resistência (m^{-1})	(UF+NF)		(UF+UV+NF)		(UF+POA+NF)	
	Valor ($\times 10^{14}$)	%	Valor ($\times 10^{14}$)	%	Valor ($\times 10^{14}$)	%
Incrustação total	0,33	-	0,51	-	0,81	-
Incrustação irreversível	0,15	44,16	0,17	33,28	0,12	15,28
Incrustação reversível	0,19	55,84	0,34	66,72	0,69	84,72

Como pode ser observado para os três processos, a maior parcela da incrustação se deve majoritariamente à incrustação reversível, a qual não necessita da aplicação de processos químicos para a sua retirada, diminuindo os custos do processo. Enquanto, a incrustação irreversível é muito similar para os três casos, a incrustação

reversível é variável, sendo superior para as rotas com radiação UV e UV/H₂O₂. Isso pode ser causado pela adsorção de compostos na superfície da membrana, bem como dentro dos seus poros, levando ao seu bloqueamento total ou parcial. Além disso, pode ter ocorrido a formação de uma camada de gel sobre a membrana provocada pela precipitação de moléculas na sua superfície, devido à alta concentração de soluto próximo a membrana.

CONCLUSÃO

Diante do exposto, pode-se dizer que os processos de NF, fotoperoxidação e foto-oxidação se apresentaram como alternativas interessantes e eficazes para o tratamento de efluente têxtil, visto que para as combinações estudadas foram obtidos permeados com condutividades baixas e, portanto, baixas concentrações de sólidos dissolvidos totais. Desse modo, constata-se que o efluente tratado encontra-se apto para ser reutilizado na indústria.

Avaliando a conjugação da fotoperoxidação e foto-oxidação com a NF foi verificada uma elevada remoção de condutividade, superior a 97%. Todavia, houve uma maior incrustação da membrana, a qual está relacionada com um fluxo de permeado menor. Assim, pode-se afirmar que a associação dos dois processos oxidativos avançados avaliados e NF não é benéfica, sendo que o uso apenas de NF proporciona menor incrustação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater Part 4000 INORGANIC NONMETALLIC CONSTITUENTS Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 1999.
2. ANDRADE, L. H. Evaluation of membrane separation process for the treatment of gold mining effluent. Belo Horizonte. 2016. Dissertação de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.
3. AUONI, A., FERSI, C., CUARTAS-URIBE, B., BES-PÍA, A., ALCAINA-MIRANDA, M. I., DHAHBI, M. *Reactive dyes rejection and textile effluent treatment study using ultrafiltration and nanofiltration processes. Desalination*, v. 29, p. 87-96, 2012.
4. BRILLAS, E., SIRÉS, I., OTURAN, M. A. *Eletro-fenton process and related electrochemical Technologies based on fenton's reaction chemistry. Chemical Reviews*, v. 109, p. 6570-6631, 2009.
5. CHOLLOM, M. N., RATHILAL, S., PILLAY, V. L., ALFA, D. *The applicability of nanofiltration for the treatment and reuse of textile reactive dye effluent. Water SA*, v. 41, p. 398-405, 2015.
6. KUNZ, A., PERALTA-ZAMORA, P., MORAES, S. G., DURÁN, N. *Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. Química Nova*, v. 25, p. 78-82, 2002.
7. MACHULEK, A., MORAES, J. E. F., VAUTIER-GIONGO, C., SILVERIO, C. A., FRIEDRICH, L. C., NASCIMENTO, C. A. O., GONZALEZ, M. C., QUINA, F. H. *Abatement of the inhibitory effect of chloride anions on the photo-fenton process. Environmental Science & Technology*, v.41, p. 8459-8463, 2007.
8. MALATO, S., FERNÁNDEZ-IBÁÑEZ, P., MALDONADO, M. I., BLANCO, J., GERNJAK, W. *Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: Recent overview and trends. Catalysis Today*, v. 147, p. 1-59, 2009.
9. RICCI, B. C. Avaliação do uso de processos de separação por membranas na remoção de metais, recuperação de ácido sulfúrico e na geração de água de reúso a partir de efluente de indústria de mineração de ouro. Belo Horizonte. 2015. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
10. SANTOS, A. B.; CERVANTES, F. J.; VAN LIER, J. B. *Review paper on current technologies for decolourisation of textile wastewaters: Perspectives for anaerobic biotechnology. Bioresource Technology*, v. 98, p. 2369-2385, 2007.
11. STARLING, M. C. V. M. Aplicação de foto-fenton solar em efluente têxtil visando à obtenção de água de reúso. Belo Horizonte. 2016. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais, 2016.
12. VAJNHANDL, S., VALH, J. V. *The status of water reuse in European textile sector. Journal of Environmental Management*, v. 141, p. 29-35, 2014.
13. VILLAR, V. J. P., PINHO, L. X., PINTOR, A. M. A., BOAVENTURA, R. A. R. *Treatment of textile wastewaters by solar-driven advanced oxidation processes. Solar Energy*, v. 85, p. 1927-1934, 2011.