

Modelação matemática e otimização operacional de processos de membrana de ultrafiltração

Mathematical modeling and operational optimization of ultrafiltration membrane processes

Sandro Rogério Lautenschlager

Engenheiro Civil pela Universidade Estadual de Maringá (UEM). Doutor em Engenharia Civil pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Professor adjunto do Departamento de Engenharia Civil da UEM

Sidney Seckler Ferreira Filho

Engenheiro Civil pela EPUSP. Professor-associado do Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da EPUSP

Osni Pereira

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Doutor em Engenharia Civil pela EPUSP. Professor-associado do Departamento de Engenharia Civil da UEM

Resumo

A utilização de processos de membrana em Engenharia Ambiental tem expandido de forma significativa nos últimos anos e, tendo em vista a importância da possibilidade de otimização da sua operação com vistas à produção máxima de permeado em função do tempo, este trabalho teve por objetivo definir uma técnica de otimização da operação de sistemas de ultrafiltração mediante o estudo de ciclos de operação e lavagem. Os ensaios experimentais foram efetuados tendo-se empregado duas membranas de ultrafiltração com diferentes pesos moleculares de corte e, com base nos resultados experimentais, foi possível a proposição de um modelo matemático que permitiu a otimização da operação de sistemas de ultrafiltração, o que possibilitou o aumento da produção do volume de permeado em cerca de 14%.

Palavras-chave: processos de membrana; ultrafiltração; modelação matemática; reúso de água.

Abstract

The utilization of membrane processes in Environmental Engineering has expanded significantly in the last few years. This paper had the primary objective of defining an optimization technique for ultrafiltration (UF) membrane operation by studying UF membrane operation and backwashing cycles. The main importance of UF operation optimization is to maximize permeation production as a function of time. Experimental tests were conducted with two UF membranes with different molecular weight cutoff. The experimental results led to the proposition of a mathematical model for the optimization of UF systems; such optimization conducted in practice to an increase of 14% in the permeate volume production.

Keywords: membrane processes; ultrafiltration; mathematical modeling; water reuse.

Introdução

O uso de membranas no tratamento de efluentes tem expandido significativamente em função, basicamente, da adoção de Padrões de Emissão mais restritivos estabelecidos para lançamento de efluentes em corpos receptores e sistemas de coleta de esgotos sanitários, a escassez de mananciais e a necessidade de implantação de programas de conservação de água. Dessa forma, tem-se viabilizado projetos de reúso do efluente como água industrial, irrigação e muitas outras aplicações de água não potável. A filtração por membrana é

uma técnica de filtração no qual a membrana age como uma barreira seletiva entre duas fases (MULDER, 1997). Como resultado da força através da membrana, os componentes são transportados à sua superfície; alguns são, dessa forma, retidos e outros passam por ela. O processo pode ter inúmeras aplicações, cada uma com sua própria característica de separação:

- Processos orientados pela pressão: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (OR);
- Processos orientados pela concentração: separação de gases, per-vaporação e diálise;

Endereço para correspondência: Sandro Rogério Lautenschlager – Departamento de Engenharia Civil da UEM – Avenida Colombo, 5.790, bloco C67, sala 209 – Campus Universitário Sede – 87020-900 – Maringá (PA), Brasil – Tel./Fax: (44) 3261-4322 – E-mail: srlager@uem.br
Recebido: 3/12/07 – **Aceito:** 10/3/09 – **Reg. ABES:** 184/07

- Processos orientados pela temperatura: destilação por membranas;
- Processos orientados pela eletricidade: eletrodialise.

No tratamento de águas e efluentes, os processos orientados pela pressão são os mais usuais. Na Tabela 1, apresenta-se um resumo das principais características desses processos.

As membranas de MF e UF são operadas em condições similares de pressão, como se observa na Tabela 1, mas diferem no tamanho da abertura do poro. Uma completa rejeição de vírus pode ser obtida quando uma correta membrana de UF é usada. Entretanto, quando se utiliza MF não se tem uma remoção de vírus adequada (MADAENI, 1999). Na prática, outras diferenças relacionadas ao diâmetro do poro das membranas podem ser mencionadas, especialmente no uso de MF ou UF como pré-tratamento antes de sistemas de osmose reversa. Quando UF é utilizada como pré-tratamento para osmose, pressões mais baixas são observadas nas membranas de OR e os intervalos de limpeza são maiores do que quando se utiliza MF (KIM; PAUL CHEN; TING, 2002).

Em comparação aos outros tipos de membrana, pode-se dizer que UF é um processo que opera em baixa pressão, sendo efetivo na separação de partículas, de determinados micro-organismos

e de compostos orgânicos de alto peso molecular. Essa tecnologia tem sido aplicada no tratamento avançado de efluentes. Mais recentemente, o processo de membranas submersas em reatores (MBR) tem substituído a clarificação secundária e a filtração em sistema de tratamento de efluentes por lodos ativados (COTE; BUISSON; PRADERIE, 1998).

Uma das desvantagens do uso de UF no tratamento de efluentes é o inevitável acúmulo de substâncias na superfície da membrana que ocasionam a sua colmatção (*fouling*). Assim, uma rotina periódica de limpeza deve ser incorporada na operação do sistema de membrana como uma medida preventiva contra a possibilidade de severa colmatção da membrana ou mesmo sua colmatção irreversível. As membranas de UF podem ser limpas por métodos físicos e químicos. Os métodos de limpeza físicos dependem de forças mecânicas para deslocar e remover substâncias aderidas na superfície da membrana. Os métodos físicos incluem a lavagem rápida na direção do fluxo (*flushing*) e/ou *flushing* reverso e retrolavagem (EBRAHIM, 1994). Os métodos químicos dependem de reações químicas para quebrar as forças de coesão entre as substâncias aderidas na superfície da membrana. As reações químicas envolvidas na limpeza química compreendem hidrólise, digestão, saponificação, solubilização e dispersão (TRÄGARDH, 1989). Há, ainda, a necessidade de se desenvolverem procedimentos de limpeza que possam auxiliar na maximização do volume líquido produzido por ultrafiltração.

A eficiência de um método de limpeza é função de múltiplos parâmetros tais como, condições hidrodinâmicas, concentração e temperatura das soluções químicas assim como a sequência utilizada na limpeza (KIM; DIGIANO, 2005). Existe um consenso de que o fluxo do permeado, a velocidade do concentrado (em aplicações em filtração tangencial em fibra oca), a frequência de retrolavagem, a duração e a adição de cloro durante a retrolavagem são fatores importantes a serem avaliados visando a minimizar a colmatção da membrana. A Figura 1 ilustra um módulo de membrana em fibra oca, como o utilizado na investigação experimental durante um ciclo de produção e retrolavagem.

Dessa forma, um sistema de UF operando em uma condição de pressão transmembrânica constante tenderá a apresentar uma variação do fluxo de permeado em função do tempo, sendo essa redução em função do grau de deposição de partícula coloidais e macromoléculas na superfície da membrana. Caso a permeabilidade

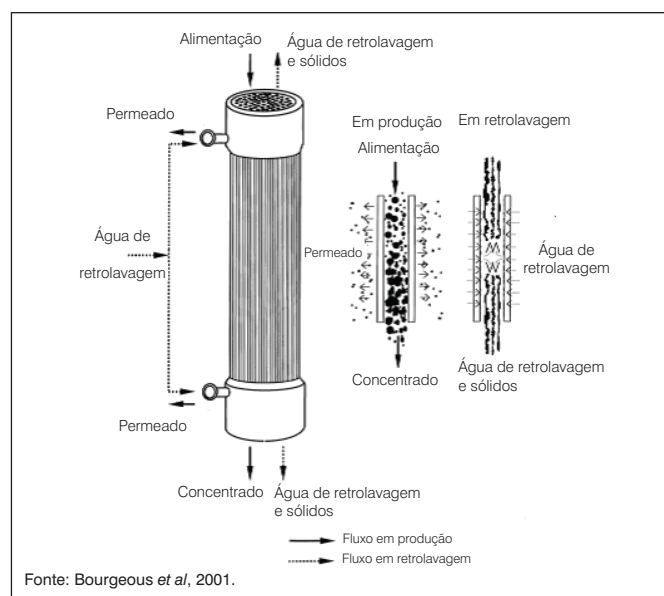


Figura 1 – Módulo de UF em fibra oca durante um ciclo de produção e retrolavagem

Tabela 1 - Membrana e aplicação para tratamento de água

Processo	Pressão (bar)	Abertura do poro(nm)	Componentes Removidos
Microfiltração	0,1-2	100-1000	Sólidos Suspensos, bactérias
Ultrafiltração	0,1-2	10-100	Macromoléculas, vírus, proteínas
Nanofiltração	4-20	1-10	Micropoluentes, íons divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-})
Osmose Reversa	10-30	0,1-1	Íons monovalentes (Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^-), íons divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-}) e micropoluentes

Fonte: Mulder (1997).

seja reduzida até um valor pré-determinado, a operação do módulo de UF é interrompida e, em seguida, é efetuada a sua lavagem. Tradicionalmente, os sistemas de UF são programados para operar em intervalos de tempo de 30 a 90 minutos, sendo que os seus processos de lavagem apresentam duração de dois a cinco minutos. Por apresentarem carreiras de filtração mais curtas em comparação aos sistemas tradicionais de filtração em meio granular, via de regra, os sistemas de UF são automatizados e, desse modo, a sua operação independe da ação humana.

Uma vez que um dos objetivos fundamentais da otimização operacional de sistemas de UF é a maximização do volume de permeado produzido ao longo do tempo, faz-se importante a definição de condições operacionais de ciclos de operação e lavagem que permitam a sua viabilidade econômica.

Objetivo

O objetivo deste trabalho foi definir uma técnica de otimização da operação de sistemas de UF mediante o estudo de ciclos de operação e lavagem. Pretendeu-se:

- propor uma modelação matemática para a otimização dos ciclos de operação e lavagem em um sistema de UF;
- definir condições ótimas de operação de um sistema de UF objetivando a maximização da produção de permeado.

Material e métodos

Modelação matemática do processo de ultrafiltração

A proposta de modelagem matemática de sistemas de UF é realizar uma abordagem simplificada a fim de que os profissionais envolvidos em testes em escala piloto ou na operação de unidades de UF possam utilizá-la, com a finalidade de obter uma compreensão melhor do sistema e, dessa forma, permitir a otimização da unidade com vistas à maximização do volume de permeado (LAUTENSCHLAGER *et al*, 2007).

A permeabilidade é um parâmetro comum para quantificar a *performance* de um sistema de membrana por UF. Portanto, um modelo para quantificar o volume de líquido produzido por um sistema de membrana pode ser formulado considerando-se que a colmatção ocasiona um decréscimo linear na permeabilidade com o tempo (t), após a sua retrolavagem (Retro). A Figura 2 ilustra o modelo linear para a permeabilidade como função do tempo após retrolavagem.

$$P_{\text{Retro}}(t) = a \cdot t_{\text{Retro}} + b \quad \text{Equação 1}$$

onde:

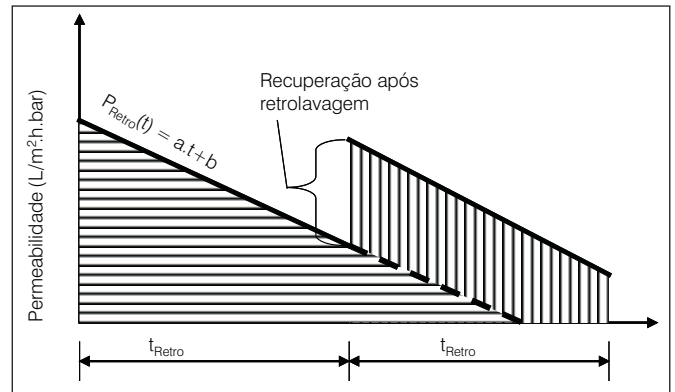


Figura 2 – Modelo linear da permeabilidade como função do tempo após retrolavagem

P_{Retro} : permeabilidade após retrolavagem ($L/m^2 \cdot h \cdot bar$);

a, b : coeficientes a serem determinadas para cada tipo de efluente;

t_{Retro} : tempo após retrolavagem.

Dessa forma, imediatamente após a retrolavagem do sistema de UF a sua permeabilidade é máxima e no decorrer de sua operação e consequente deposição de partículas coloidais e macromoléculas, passa a ocorrer a sua diminuição ao longo do tempo. A função da evolução da permeabilidade de um sistema de UF pode assumir, com o tempo, um diferente comportamento do linear, sendo definido pelo tipo de membrana e constituintes removidos e pelo padrão de deposição destes na superfície do sistema de UF. No entanto, em face da simplicidade de adoção de modelos lineares, e uma vez que os resultados experimentais obtidos suportam tal hipótese, decidiu-se pela sua adoção.

Um modelo geral que permite a obtenção do volume de líquido produzido pela UF para qualquer função da permeabilidade decrescente após a retrolavagem pode ser escrito da seguinte forma:

$$VLP = n \cdot A \cdot \int_0^{t_{\text{Retro}}} P_{\text{Retro}}(t) \Delta P dt - n \cdot VG_{\text{Retro}} \quad \text{Equação 2}$$

onde:

VLP : volume de permeado produzido (L);

A : área da membrana (m^2);

n : representa o número de retrolavagens realizadas durante um ciclo;

VG_{Retro} : volume gasto durante cada retrolavagem (L);

ΔP : pressão transmembranica (TMP) (bar).

Dessa forma, admitindo-se um ciclo de 60 minutos composto por inúmeras operações de lavagem, tem-se que o volume de permeado produzido deverá ser a somatória dos volumes gerados nos períodos de operação, sendo esta função da permeabilidade com o tempo, subtraído dos volumes de permeado gasto em cada retrolavagem.

Tradicionalmente, os sistemas de UF tendem a ser operados com intervalos de operação de 30 a 90 minutos, independentemente

do volume de permeado produzido. Dessa forma, uma vez atingido um determinado tempo de operação, o módulo de UF tem sua operação interrompida e é efetuada a sua lavagem. Como cada sistema de UF deverá apresentar as suas próprias funções de decréscimo de permeabilidade com o tempo, a otimização do volume de permeado deverá ser conseguida definindo-se um intervalo de

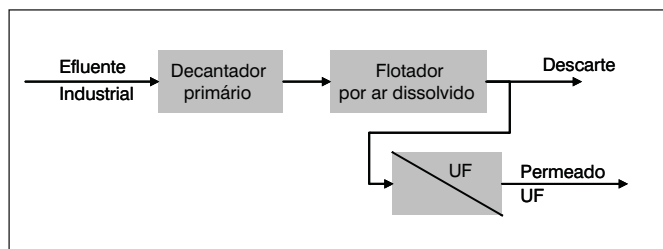


Figura 3 – Fluxograma dos processos de tratamento de efluente com a unidade piloto de ultrafiltração

Tabela 2 – Parâmetros monitorados durante a execução da investigação experimental

Parâmetro	Unidade
Vazão do permeado e concentrado	m ³ /h
Pressão de alimentação, recirculação e permeado	bar
Temperatura	°C
Tempo após retrolavagem	minutos

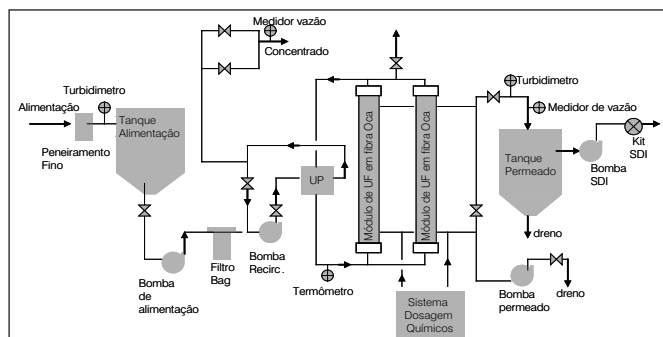


Figura 4 – Fluxograma da instalação piloto de ultrafiltração

Tabela 3 – Propriedades da membrana de ultrafiltração, membrana 1 HF – 82-35-PM100 (Koch®)

Diâmetro nominal da fibra	0,035" (0,9 mm)
Diâmetro externo da carcaça	5" (127 mm)
Comprimento do cartucho	43" (1.090 mm)
Área nominal da membrana	82 ft ² (7,6 m ²)
Peso molecular de corte	100.000 Daltons

Tabela 4 – Propriedades da membrana de ultrafiltração, membrana 2 HF – 92-35-PMTOC (Koch®)

Diâmetro nominal da fibra	0,035" (0,9 mm);
Diâmetro externo da carcaça	5" (127 mm);
Comprimento do cartucho	43" (1.090 mm);
Área nominal da membrana	92 ft ² (8,5 m ²);
Peso molecular de corte	50.000 Daltons

tempo entre lavagens que permita a maximização do volume de permeado com o tempo, sem que seja necessária a adoção de tempos de operação pré-definidos.

Investigação experimental

Os ensaios experimentais foram realizados em uma fábrica de produtos de limpeza e higiene pessoal e a unidade de UF recebeu o efluente industrial pré-tratado após a sua remoção de material solúvel em n-hexano (óleos e graxas) conforme fluxograma de processo (Figura 3). As variáveis monitoradas para o ensaio em escala piloto estão apresentadas na Tabela 2.

Os parâmetros foram monitorados *online* com intervalos de amostragem entre 1 e 15 minutos. O diagrama da instalação piloto de modo simplificado é apresentado na Figura 4. Ela é composta de um tanque de alimentação de 240 L, um tanque de permeado de 240 L, dois cartuchos de ultrafiltração em fibra oca (como descrito nas Tabelas 3 e 4), um painel de controle, uma bomba de alimentação, uma bomba de recirculação, uma bomba de permeado, um filtro de cartucho e um sistema de limpeza química da membrana *in loco*.

Os instrumentos utilizados no controle da instalação piloto foram a pressão (manômetros Zurich, São Paulo), temperatura (termômetros Zurich, São Paulo), pH (Modelo P-33, Great Lakes Instruments/Hach, Loveland Colorado), turbidímetro (Modelo T1054, Fisher Rosemount/ Emerson Process Management, Irvine Califórnia) e medidor do fluxo permeado e concentrado (Modelo 8721 Fisher Rosemount/ Emerson Process Management, Irvine Califórnia).

A instalação piloto operou no modo de filtração tangencial (*cross-flow*) de dentro para fora, isto é, com o efluente entrando por dentro de cada fibra de microfiltração e o permeado sendo coletado na parte externa da mesma. O concentrado retornou para o início do processo de tratamento através de uma bomba de recirculação. A lavagem das membranas de UF foi efetuada empregando-se cerca de 40 L de água permeada em cada operação.

Foram empregadas duas membranas na investigação experimental para avaliar o desempenho quanto à permeabilidade de cada tipo de membrana. A primeira membrana utilizada (membrana 1) tem um peso molecular de corte maior do que a segunda (membrana 2). As características de ambas as membranas são apresentadas nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

A execução dos ensaios experimentais foi efetuada de modo que pudessem ser avaliados os resultados experimentais de ambas as membranas com respeito à produção de permeado, na definição de uma proposição de modelação matemática para a otimização dos ciclos de operação e lavagem em um sistema de UF, bem como em suas condições ótimas de operação objetivando a maximização da produção de permeado. Dessa forma, a membrana 1 foi operada em uma fase, enquanto a membrana 2 foi avaliada em duas fases de operação.

Resultados

Membrana 1, fase 1

As Figuras 5 e 6 apresentam os dados de permeabilidade e pressão para o período de teste conduzido com a membrana 1 e a correlação entre a permeabilidade e o tempo após a retrolavagem, respectivamente.

O sistema operou com uma pressão transmembrânica (TMP) próxima a 0,8 bar, sendo que a permeabilidade média para o período foi de 96 (L/m².h.bar), valor compatível com o esperado para sistemas de UF. No início do ciclo de UF, por ter sido a mesma anteriormente lavada, esta apresenta um menor valor de perda de carga e, assim, a sua permeabilidade tende a ser máxima. Observou-se que logo após retrolavagem ($t_{\text{Retro}} = 0$) a sua permeabilidade inicial foi de 127,4 (L/m².h.bar).

Com base nos resultados experimentais de permeabilidade com o tempo (Figura 6), observou-se que é razoável a modelação matemática da função da permeabilidade com o tempo assumindo-se uma variação linear entre ambas as grandezas. Nota-se que a variação da permeabilidade em função do tempo, uma vez considerando-se um tempo de operação de 30 minutos, foi de cerca de 127 (L/m².h.bar) no tempo zero para 60 (L/m².h.bar) após 30 minutos, ou seja, uma redução de cerca de 50% em relação ao seu valor inicial.

Com base na relação estabelecida entre a permeabilidade e o tempo após a retrolavagem, pode-se empregar o modelo matemático proposto para fins de otimização do sistema de UF (Equação 2), definindo-se em um ciclo típico de 30 minutos a produção do volume de permeado em função do intervalo de tempo entre as retrolavagens. Os resultados obtidos de volume de permeado e número de retrolavagens por hora em função do intervalo de tempo entre as mesmas encontram-se dispostos na Figura 7.

Durante a execução dos ensaios experimentais, foi utilizado um intervalo de tempo entre retrolavagens de 30 minutos, sendo que o consumo de água em cada operação de retrolavagem foi de cerca de 40 L. A adoção do intervalo de tempo entre retrolavagens de 30 minutos foi admitida pelo fato de ser, tradicionalmente, o método empregado na operação de sistemas de UF.

Mediante a modelação matemática proposta, foi possível determinar o máximo volume líquido de água produzido pelo sistema com a mesma área de membrana. Observando-se a Figura 7, nota-se que para um tempo entre lavagens de 30 minutos, a produção de permeado seria de 642 L para um ciclo de uma hora. No entanto, observa-se que a curva de volume de permeado em função do intervalo de tempo entre lavagens apresenta um ponto de máximo, e isso significa que deverá haver um valor de tempo entre lavagens que permite a maximização do volume de permeado produzido pelo sistema de UF.

Para esse caso particular, o tempo ideal entre as retrolavagens foi de 18 minutos e, dessa maneira, o volume de permeado produzido em um ciclo de uma hora com retrolavagens a cada 18 minutos seria de 682 L, e não de 642 L produzidos caso os intervalos de tempo entre retrolavagens fossem a cada 30 minutos.

Caso o sistema de UF passe a operar com intervalos de tempo entre retrolavagem de 18 minutos, pode-se assumir um acréscimo

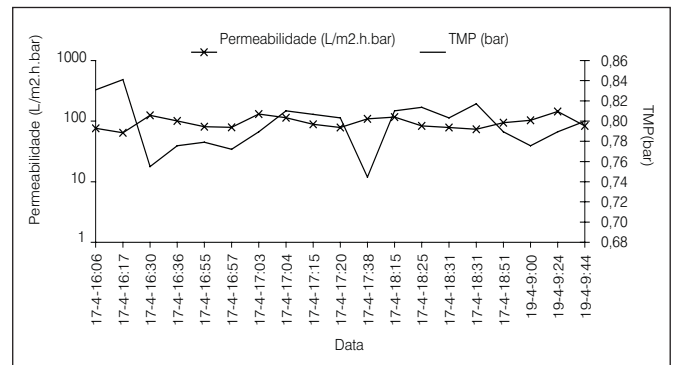


Figura 5 – Permeabilidade e pressão transmembrânica para membrana 1

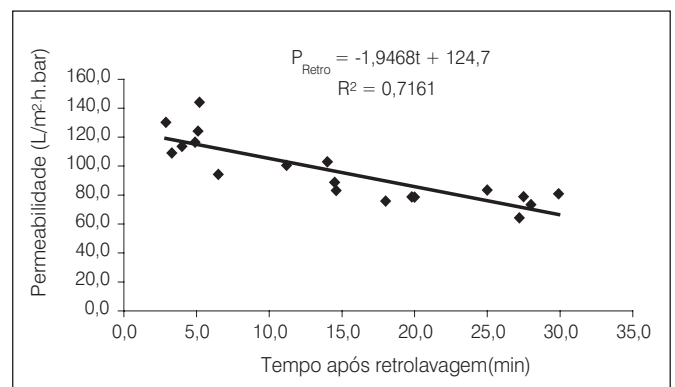


Figura 6 – Correlação entre a permeabilidade e tempo após retrolavagem para membrana 1

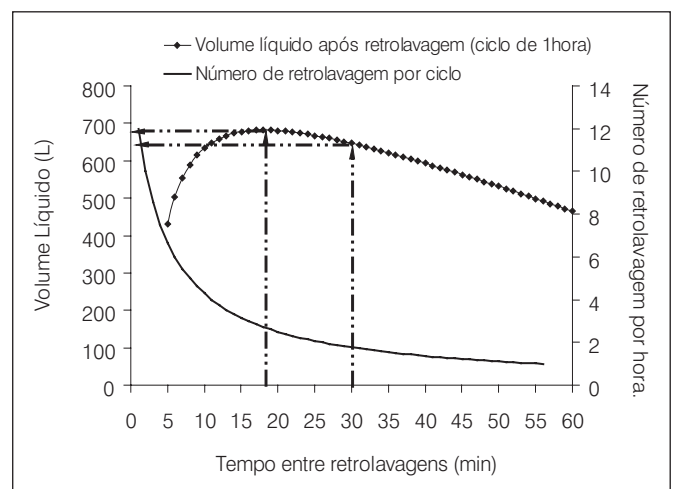


Figura 7 – Volume líquido produzido pela UF em diversos intervalos de retrolavagem para membrana 1

no volume de permeado produzido de até 6% para a mesma área de membrana.

Para o período de testes com a membrana 1, a turbidez média na água de alimentação ao sistema de UF foi de 66 UNT e a turbidez média do permeado foi de 2,9 UNT, o que representou uma redução média de 95% em seu valor. No entanto, objetivando-se uma melhoria da qualidade do permeado produzido, decidiu-se pela execução de ensaios experimentais com uma membrana de menor peso molecular de corte, tendo-se definido a membrana 2.

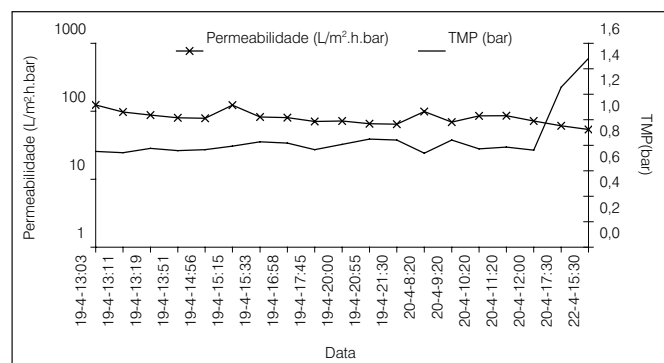


Figura 8 – Permeabilidade e pressão transmembrânica para membrana 2, fase 1

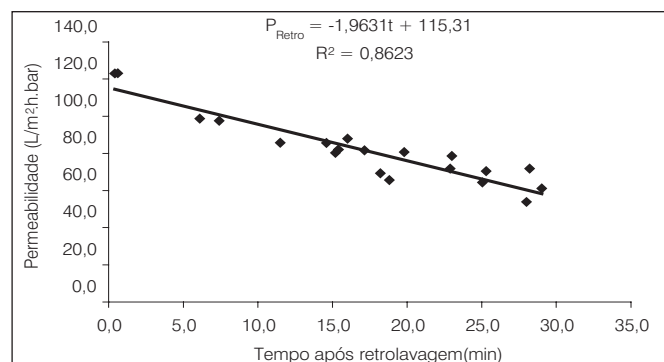


Figura 9 – Correlação entre a permeabilidade e tempo após retrolavagem para membrana 2, fase 1

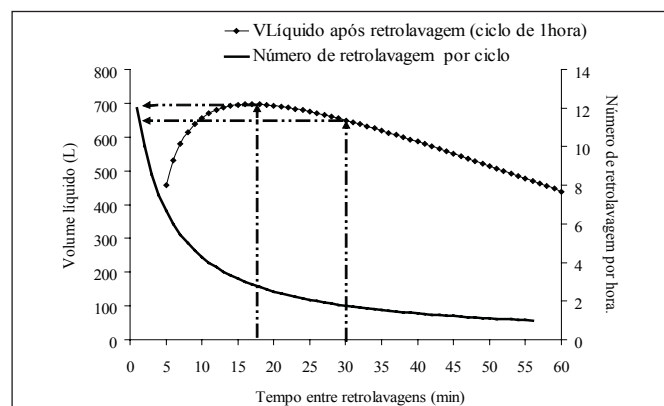


Figura 10 – Volume líquido produzido pela UF em diversos intervalos de retrolavagem para membrana 2, fase 1

Membrana 2, fase 1

Utilizou-se um segundo tipo de membrana (HF-92-35-PMTOC) com peso molecular de corte menor do que a membrana 1 (Tabela 3), sendo que as suas propriedades encontram-se apresentadas na Tabela 4.

O período de teste com a membrana HF-92-35-PMTOC foi dividido em duas fases: a primeira fase compreendeu o período de 19 de abril às 13:03 a 22 de abril às 15:30. Após essa data, a membrana 2 recebeu uma elevada carga de óleos e graxas (O&G), em torno de aproximadamente 50 mg/L, o que provocou a sua colmatção. Após a ocorrência, realizou-se uma limpeza química da membrana. No entanto, a permeabilidade tornou-se muito diferente da permeabilidade inicial. Assim, separaram-se os dados em duas fases, definindo-se fase 1 a fase anterior à colmatção e fase 2 a posterior à sua colmatção.

As Figuras 8 e 9 apresentam os dados de permeabilidade e pressão para o período de teste conduzido com a membrana 2 (Fase 1) e a correlação entre a permeabilidade e o tempo após a retrolavagem, respectivamente.

Segundo a Figura 8, a permeabilidade média para o período foi 82 (L/m².h.bar), valor ligeiramente inferior em comparação à membrana 1.

Imediatamente após a retrolavagem ($t_{\text{Retro}} = 0$), a permeabilidade da membrana 2 (Fase 1) situou-se em torno de 116 (L/m².h.bar) e, após 30 minutos de operação, o seu valor foi reduzido para cerca de 56 (L/m².h.bar). Quando comparado à membrana 1, fase 1, observou-se uma variação da permeabilidade com o tempo, podendo ser razoavelmente descrita como linear, uma vez que o seu coeficiente de determinação obtido foi 0,86.

Empregando-se a mesma metodologia utilizada na membrana 1, fase 1, com base na relação estabelecida entre a permeabilidade e o tempo após a retrolavagem, pode-se empregar o modelo matemático proposto para fins de otimização do sistema de UF (Equação 2) definindo-se em um ciclo típico de 30 minutos a produção do volume de permeado em função do intervalo de tempo entre as retrolavagens. Os resultados obtidos de volume de permeado e número de retrolavagens por hora em função do intervalo de tempo entre as mesmas são apresentados na Figura 10.

Observando os resultados apresentados na Figura 10, nota-se que para um intervalo de tempo entre retrolavagens de 30 minutos, o volume de permeado produzido seria de 649 L. Mediante a otimização da produção de permeado em função do intervalo de retrolavagens, tem-se que para um tempo de 17 minutos, foi possível a maximização do volume de permeado, tendo-se obtido um volume de 697 L, valor 7% maior quando comparado a um ciclo padrão de 30 minutos.

Para ambas as membranas empregadas na investigação experimental, foi plenamente possível estabelecer uma relação matemática entre a permeabilidade em função do tempo e, com base nelas, a otimização do processo de UF com respeito à maximização do volume

de permeado com o tempo. Ressalta-se que, embora as relações obtidas entre as permeabilidades com o tempo para ambas as membranas tenham sido lineares independentemente do seu comportamento matemático, é plenamente possível o uso da Equação 2 para a previsão e otimização do processo de UF.

Membrana 2, fase 2

Os resultados experimentais obtidos para a fase 2 foram caracterizados por um aumento significativo da pressão transmembrânica, indicando uma colmatação. Após análise de óleos e graxas no efluente do sistema de flotação por ar dissolvido, identificou-se que a sua remoção foi bastante reduzida, tendo sido produzidos efluentes com concentrações de óleos e graxas com aproximadamente 50 mg/L. Desse modo, associou-se o aumento de pressão na membrana de UF ao recebimento de efluentes com alta concentração de óleos e graxas.

Como consequência direta da colmatação das membranas, resultante da alimentação com efluente com elevada concentração de óleos e graxas, observou-se um decréscimo da sua permeabilidade de uma média de 82 ($L/m^2 \cdot h \cdot bar$) antes da sua colmatação para 37 ($L/m^2 \cdot h \cdot bar$) após a ocorrência, o que representa em uma redução de 55% em sua permeabilidade média.

As Figuras 11 e 12 apresentam os dados de permeabilidade e pressão para o período de teste conduzido com a membrana 2 (fase 2) e a correlação entre a permeabilidade e o tempo após a retrolavagem, respectivamente. A permeabilidade média para o período foi 37 ($L/m^2 \cdot h \cdot bar$), valor bastante inferior em comparação aos resultados obtidos com a mesma membrana na fase 1.

Analisando-se os valores de permeabilidade com o tempo (Figura 12), nota-se que logo após a retrolavagem ($t_{Retro} = 0$) das membranas a sua permeabilidade foi de 72,13 ($L/m^2 \cdot h \cdot bar$) e, após 30 minutos de operação, foi reduzida para 15,6 ($L/m^2 \cdot h \cdot bar$), o que representa uma redução de aproximadamente 78% em relação ao seu valor inicial.

De forma similar aos casos anteriores, mediante a relação entre a permeabilidade, o tempo de operação do sistema de UF (Figura 12) e o modelo matemático proposto (Equação 2), é possível elaborar a relação entre o volume de permeado produzido em função do intervalo entre lavagens. Os resultados calculados estão apresentados na Figura 13.

A análise dos resultados apresentados na Figura 13 indica que, para um intervalo de tempo entre retrolavagens de 30 minutos, o volume de permeado produzido tenderia a 293 L. Com base na otimização da produção de permeado em função do intervalo de retrolavagens, nota-se que o tempo entre retrolavagens que permite a obtenção de um volume de permeado máximo é de 17 minutos, sendo que, para este, o volume de permeado produzido seria igual a 336 L. Dessa forma, o acréscimo na capacidade de produção de permeado

seria de 14% em relação ao obtido para um intervalo padrão entre retrolavagens igual a 30 minutos.

É interessante observar que, independentemente das condições operacionais das membranas utilizadas na investigação experimental, uma vez tendo-se obtido uma relação entre a permeabilidade com o tempo, foi possível a determinação de um tempo de operação ótimo entre retrolavagens que permitiu a maximização do volume de permeado.

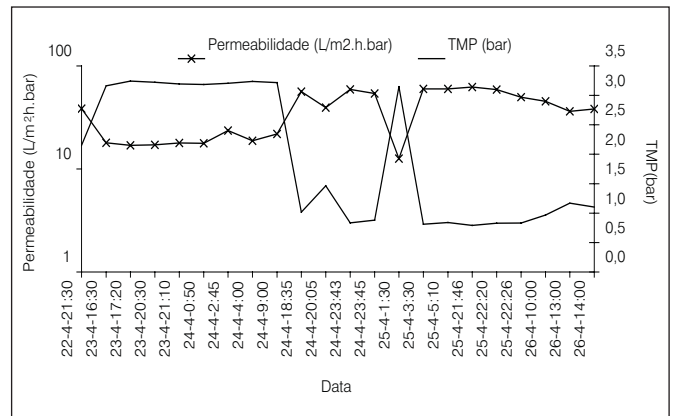


Figura 11 – Permeabilidade e pressão transmembrânica para membrana 2, fase 2

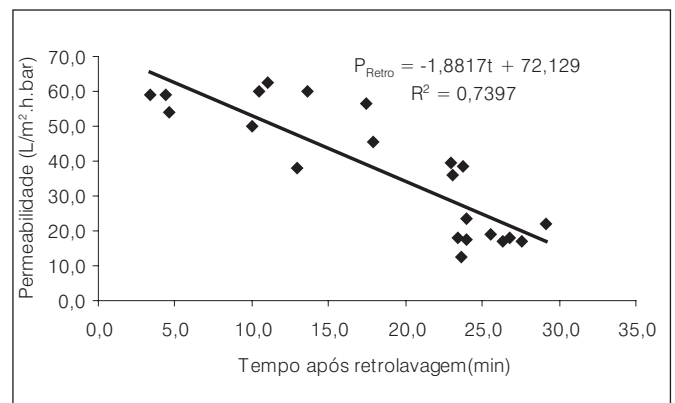


Figura 12 – Correlação entre a permeabilidade e tempo após retrolavagem para membrana 2, fase 2

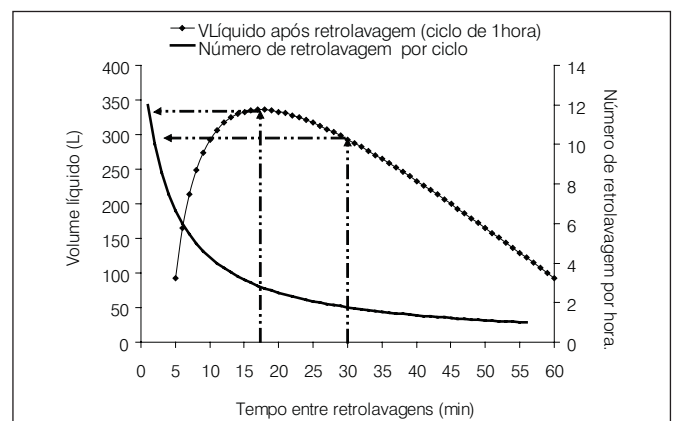


Figura 13 – Volume líquido produzido pela UF em diversos intervalos de retrolavagem para membrana 2, fase 2

Roteiro para otimização de um sistema de ultrafiltração

Assim sendo, os seguintes passos são requeridos para maximizar o volume líquido produzido por um sistema de UF baseado no intervalo entre as retrolavagens:

- estabelecer a relação entre taxa de colmatação da membrana, isto é, uma relação entre a permeabilidade e o tempo após a retrolavagem. Esta relação não precisa ser necessariamente linear. Para estabelecer essa relação faz-se necessário monitorar:
 - vazão de alimentação e do permeado;
 - pressão da alimentação, permeado e recirculação;
 - temperatura;
 - tempo após retrolavagem;
 - volume gasto com a retrolavagem;
- estabelecer a dosagem adequada de químicos durante a retrolavagem;
- por intermédio da Equação 2, proceder ao cálculo do volume de permeado produzido para diferentes valores de intervalo de tempo entre retrolavagens e determinar o intervalo que permitirá maximizar o volume de líquido produzido, estabelecendo um intervalo adequado para operação do sistema.

Conclusões

Com base no exposto e em função dos resultados experimentais obtidos, pode-se concluir que:

- a membrana 1 apresentou uma *performance* melhor do que a membrana 2 em termos de permeabilidade para o tipo de efluente tratado. A permeabilidade média para membrana 1 foi 127 (L/m².h.bar) e para membrana 2 foi 82 (L/m².h.bar) em condições normais de operação, sendo que essa diferença de permeabilidade está associado ao fato de ambas apresentarem pesos moleculares distintos;
- observou-se uma correlação entre a permeabilidade e o tempo após a retrolavagem das membranas de UF, sendo que a mesma pôde ser descrita como linear. A linearidade entre a permeabilidade e o tempo de operação do sistema de UF foi obtida para as diferentes membranas utilizadas na investigação experimental e sob diversas condições operacionais;
- a modelação matemática do processo de UF permitiu definir a existência de um intervalo de tempo ótimo entre retrolavagens, o que possibilita a otimização do sistema de UF mediante maximização do volume de permeado em função do tempo;
- a operação do sistema de UF dentro de suas condições operacionais ótimas permitiu uma maximização da produção do volume de permeado, permitindo ganhos que variaram de 6 a 14% em seu valor.

Agradecimentos

Agradecemos à Veolia Water Systems Brasil pelo suporte financeiro concedido, aos engenheiros Roberto Meirelles, Wilson Marin e Derli Forti da empresa WGM Sistemas Importação e Exportação Ltda.

Referências

- BOURGEOUS, K.N.; DARBY, J.L.; TCHOBANOGLIOUS, G. Ultrafiltration of wastewater: effects of particles, mode of operation, and backwash effectiveness. *Water Research*, v. 35, n. 1, p. 77-90, 2001.
- COTE, P.; BUISSON, H.; PRADERIE, M. Immersed Membranes Activated Sludge Process Applied to the Treatment of Municipal Wastewater. *Water Science and Technology*, v. 38, n. 4, p. 437-442, 1998.
- EBRAHIM, S. Cleaning and Regeneration of Membranes in Desalination and Wastewater Applications: State-of-the-art. *Desalination*, v. 96, n. 1-3, p. 225-238, 1994.
- KIM, J.H.; DIGIANO, F.A. A two-fiber, bench-scale test of ultrafiltration (UF) for investigation of fouling rate characteristics. *Journal of Membrane Science*, v. 271, n. 1-2, p. 196-204, 2005.
- KIM, S.L., PAUL CHEN, J.; TING, Y.P. Study on feed pretreatment for membrane filtration of secondary effluent. *Separation and Purification Technology*, v. 29, n. 2, p. 171-179, 2002.
- LAUTENSCHLAGER, S.R. *et al.* A net water production model for ultrafiltration including flow direction reversal and chemically assisted backwashing. *Water Environment Research*, v. 79, n. 8, p. 877-886, 2007.
- MADAENI, S.S. The application of membrane technology for water disinfection. *Water Research*, v. 33, n. 2, p. 301-308, 1999.
- MULDER M. *Basic principles of membrane technology*. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997.
- TRÄGÅRDH, G. Membrane cleaning. *Desalination*, v. 71, n. 3, p. 325-335, 1989.