

## **I-325 - AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE MEMBRANAS DE MICROFILTRAÇÃO NO TRATAMENTO DA ÁGUA DO LAGO PARANOÁ – DISTRITO FEDERAL**

**Mariana de Andrade Corrêa<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade de Brasília.

**Yohanna Nunes Soares Tsuzuki<sup>(1)</sup>**

Engenheira Civil pela Universidade de Brasília.

**Cristina Celia Silveira Brandão<sup>(1)</sup>**

Doutora em Engenharia Ambiental pelo Imperial College of Science and Technology da Universidade de Londres. Professora do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Campus Universitário Darcy Ribeiro. Brasília – DF- CEP: 70910-900. Endereços eletrônicos: [mari.andrade.correa@gmail.com](mailto:mari.andrade.correa@gmail.com), [yohanna\\_tsuzuki@yahoo.com.br](mailto:yohanna_tsuzuki@yahoo.com.br), [cbrandao@unb.br](mailto:cbrandao@unb.br).

### **RESUMO**

Este trabalho apresenta um estudo sobre aplicação de sistema híbrido de microfiltração submersa (MFS) para tratamento da água do lago Paranoá – DF, manancial urbano que futuramente será utilizado para abastecimento de água para consumo humano. Inicialmente foram realizados ensaios em teste de jarros adaptados para a definição das condições de coagulação e floculação a serem adotados como pré-tratamento da microfiltração. Nos ensaios de teste de jarros modificado, foram avaliados dois coagulantes, o sulfato de alumínio e a quitosana, em dois valores de pH, cinco tempos de floculação e dois gradientes de velocidade. As condições de coagulação e floculação identificadas como mais promissoras nos testes de jarros foram adotadas nos experimentos em instalação em escala de bancada de escoamento contínuo, composto pelo sistema de MFS com pré-tratamento - sistema híbrido de microfiltração submersa. A instalação foi operada com e sem pré-tratamento, em diferentes tempos de floculação, com e sem aeração, de maneira a avaliar o impacto desses fatores no desempenho do sistema. O desempenho foi avaliado considerando a qualidade da água filtrada (clorofila-*a*, cor aparente, coliformes totais, *E.coli*, matéria orgânica natural e turbidez) e a obstrução dos poros das membranas. Os ensaios em teste de jarros mostraram que o valor de pH de coagulação de 6,5 era mais indicado para utilização dos dois coagulantes. Nesse valor de pH, com adoção do gradiente de velocidade de 50 s<sup>-1</sup> para floculação e doses ótimas de 2 mg/L para a quitosana e 6 mg/L para o sulfato de alumínio, os tempos de floculação de 15 e 30 minutos apresentaram os melhores desempenhos. Dentre as variações testadas no sistema híbrido de MFS, a condição de aplicação que apresentou melhor desempenho foi com o uso do sulfato de alumínio, tempo de floculação de 15 minutos e adoção de aeração. Nessa condição houve remoção total de cor aparente, coliformes totais e *E.coli*, eficiências médias de remoção de turbidez, MON (UV<sub>254nm</sub>), clorofila-*a*, iguais a 93,2%, 62,5% e 96,2%, respectivamente, e manutenção do fluxo de água filtrada entre 97,4% e 89,5% no decorrer do tempo de operação (4 horas), em relação ao fluxo verificado com água destilada. Os resultados obtidos nesse estudo confirmam a aplicabilidade do sistema híbrido de microfiltração submersa no tratamento da água do lago Paranoá.

**PALAVRAS-CHAVE:** Tratamento de água, microfiltração submersa, sistema híbrido de microfiltração, sulfato de alumínio, quitosana.

### **INTRODUÇÃO**

A grande disponibilidade de água no território brasileiro gera uma visão equivocada de que os corpos hídricos são um recurso abundante e ilimitado. O Distrito Federal (DF) se enquadra em um cenário de potencial escassez de água por estar situado em uma região de cabeceiras de rios e também em consequência do expressivo crescimento demográfico e urbanístico.

Originalmente o lago Paranoá foi construído buscando prover lazer à população, geração de energia, paisagismo e ainda para amenizar o clima seco da região. Atualmente, além de cumprir seu papel inicial, o Lago também é utilizado como corpo receptor dos efluentes das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) Brasília Sul e Norte.

Na perspectiva de utilização futura do lago Paranoá como fonte de captação de água para consumo humano, a tecnologia de separação por membranas surge como uma opção eficiente para adequar as águas do Lago às maiores restrições de qualidade. Em comparação com o sistema de tratamento convencional, essa tecnologia se destaca, pois, além de gerar água com qualidade superior, produz baixa quantidade de lodo e requer menor área de implantação e de insumos químicos, reduzindo os impactos ambientais.

A tecnologia de separação por membranas engloba vários processos: microfiltração (MF), ultrafiltração, nanofiltração, osmose reversa e eletrodialise, que diferem no tamanho dos poros das membranas, tipo e intensidade da força motriz e capacidade de remoção. A MF, processo utilizado nesse estudo, é caracterizada pela elevada capacidade de remoção de material em suspensão e micro-organismos e requer baixas pressões para sua operação.

A MF tem sido cotejada como uma alternativa eficiente para substituição do sistema convencional, visto que essa tecnologia apresenta elevado potencial de fornecimento de água compatível com padrões de qualidade cada vez mais restritivos. Esse processo está sendo amplamente utilizado para remoção da turbidez, patógenos, microalgas e cianobactérias. Apesar de ser um método atrativo no que se refere ao abastecimento de água e saneamento, as limitações desse tipo de membrana incluem a ineficiência na remoção de matéria orgânica natural (MON) e de vírus. Contudo, a literatura indica que a adoção de um pré-tratamento (coagulação/floculação) promove o aumento da remoção da Matéria Orgânica Natural (MON) e de vírus, além de evitar a rápida formação de depósitos e obstruções na superfície da membrana, reduzindo a necessidade de lavagens e limpezas químicas (Cho et al., 2006; Leiknes, 2009).

Segundo Cho *et al.* (2006), o sistema híbrido de MF, composto pela coagulação, floculação e filtração melhora o desempenho das membranas de MF, pois reduz a resistência específica da torta de lodo, que é composta pela camada de depósitos na superfície da membrana. Esses autores também constataram que a remoção da MON é independente do tempo de floculação e que sua dependência do gradiente de velocidade é pouco significativa.

Hwang *et al.* (2008) verificaram que o aumento da taxa de aeração em sistemas de membrana submersa promoveu o aumento do fluxo de água filtrada. Isso ocorre devido ao fato de que a aeração diminui a obstrução dos poros e torna a camada de depósitos menos espessa do que em condições em que esse processo não seja aplicado.

Já Choi *et al.* (2009) verificaram que quando a taxa de aeração é muito baixa, a camada de torta formada é mais densa e que taxas de aeração muito altas podem causar um aumento da taxa de incrustação, uma vez que os flocos formados podem ser quebrados quando expostos à taxas mais elevadas.

Nesse trabalho, o primeiro a avaliar um processo de separação por membranas para o tratamento da água do lago Paranoá, caracterizada por baixa turbidez e presença de algas, foi avaliada a tecnologia híbrida de membrana de microfiltração submersa (MFS), composta por um módulo de membrana precedido da etapa de coagulação/floculação. Também foi avaliado o impacto do tipo de coagulante, do tempo de floculação e da aeração no desempenho das membranas de microfiltração submersa.

## METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos deste estudo foram realizados ensaios de MFS em escala de bancada, precedida ou não por etapas de coagulação e floculação, com o uso de sulfato de alumínio e quitosana como coagulantes. Antes dos ensaios de MFS, a eficiência dos coagulantes estudados foi avaliada por meio de ensaios em teste de jarros modificado. Dessa forma, nessa etapa foram definidas as condições de coagulação e floculação (dosagem de coagulantes, pH de coagulação, tempo de floculação e gradiente de velocidade) que seriam avaliadas nos experimentos de MFS em escala de bancada.

Uma vez definidas as condições de coagulação e floculação foram realizados os ensaios de MFS, onde foi avaliada a influência do tipo de coagulante, do tempo de floculação e da aeração no desempenho das membranas.

A escolha dos coagulantes avaliados (sulfato de alumínio e quitosana) baseou-se na ampla utilização do sulfato e nas divergências quanto aos benefícios do uso de coagulantes poliméricos no tratamento com membranas de MF (Wang et al., 2011).

Na etapa dos ensaios em teste de jarros modificado, optou-se pela associação das etapas de coagulação e floculação com a filtração em membranas de  $0,45\ \mu\text{m}$ , por não se dispor na literatura de uma metodologia específica. Escolheu-se esse arranjo para permitir a obtenção de resultados mais representativos, visando subsidiar os experimentos de MFS em escala de bancada.

Nos ensaios em teste de jarros modificado, utilizou-se gradiente de velocidade de  $1000\ \text{s}^{-1}$  para a mistura rápida e de  $25\ \text{s}^{-1}$  e  $50\ \text{s}^{-1}$  para a floculação. Foram avaliados tempos de detenção de 5, 10, 15, 30 e 45 min para a floculação, mantendo-se fixo o tempo de 30s de mistura rápida. Como é possível observar na Figura 1, e dos parágrafos que se seguem, foram realizados quatro grupos de ensaios em teste de jarros para avaliar a influência de diversos fatores no desempenho do processo coagulação/floculação/filtração.



**Figura 1 – Esquema das condições avaliadas nos ensaios em teste de jarros modificado.**

Grupo 1 – Influência do valor do pH de coagulação: O primeiro conjunto de teste de jarros teve por objetivo avaliar a influência do valor do pH no processo de coagulação/floculação/ filtração. Nesse ensaio foram adotadas dosagens de  $4\ \text{mg/L}$  para o sulfato de alumínio, e de  $1$  e  $6\ \text{mg/L}$  para a quitosana. Independente do tipo de coagulante utilizado, consideraram-se valores de  $5,0$  e  $6,5$  para o pH de coagulação,  $15$  minutos de floculação e  $50\ \text{s}^{-1}$  de gradiente de velocidade. Os valores citados foram selecionados a partir dos diagramas de coagulação/floculação/sedimentação obtidos no trabalho de Capelete (2011).

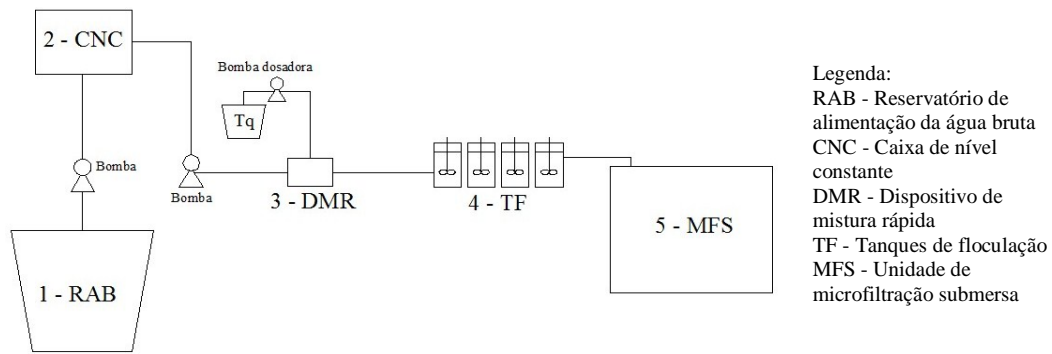
Grupo 2 – Avaliação das dosagens de coagulantes: Depois da análise da influência do pH de coagulação, foram realizados ensaios em teste de jarros para a avaliação do efeito das dosagens de sulfato de alumínio e quitosana no processo de coagulação/floculação/ filtração. Para a realização desses ensaios, foi utilizada uma faixa de dosagem de  $4\ \text{mg/L}$  a  $14\ \text{mg/L}$ , variando em intervalos de  $2\ \text{mg/L}$ , para o sulfato de alumínio e de  $1\ \text{mg/L}$  a  $6\ \text{mg/L}$ , variando em intervalos de  $1\ \text{mg/L}$ , para a quitosana. Os valores mais promissores de coagulação obtidos no ensaio anterior foram considerados para essa avaliação, e para ambos os coagulantes adotaram-se tempo de floculação igual a  $15$  minutos e gradiente de velocidade igual a  $50\ \text{s}^{-1}$ .

Grupo 3 – Estudo do tempo de floculação: De posse dos resultados obtidos na avaliação das dosagens de coagulantes, foram realizados testes de jarros para estudar a influência do tempo de floculação. Nesse ensaio foi adotado gradiente de velocidade de  $50\ \text{s}^{-1}$ , foram avaliados tempos de floculação iguais a  $5$ ,  $10$ ,  $15$  e  $30$  minutos e foram empregadas as condições de coagulação/floculação com melhores desempenhos.

Grupo 4 – Análise do gradiente de velocidade: Após o estudo do tempo de floculação, foi realizado um ensaio simples com o objetivo de analisar o efeito da alteração do gradiente de velocidade. Nesse ensaio foram testados valores de gradiente iguais a  $25\ \text{s}^{-1}$  e  $50\ \text{s}^{-1}$  na etapa de floculação e adotados os melhores tempos de floculação, doses e valores de pH obtidos nos ensaios anteriores.

A influência de cada parâmetro no desempenho do processo foi determinada por meio das análises de turbidez, de absorbância em UV  $254\text{nm}$  e do tempo necessário para filtração de  $150\ \text{mL}$  de água floculada. Com base nos resultados obtidos foram definidas as condições a serem avaliadas nos experimentos de MFS.

O sistema de MFS em escala de bancada em fluxo contínuo utilizado era composto pelas seguintes unidades: Reservatório de alimentação da água bruta (RAB); Bombas; Caixa de nível constante (CNC); Dispositivo de mistura rápida (DMR); Tanques de floculação (TF) e Instalação de microfiltração submersa (MFS). A Figura 2 apresenta um esquema da instalação e a Figura 3 ilustra uma visão da unidade de MFS.

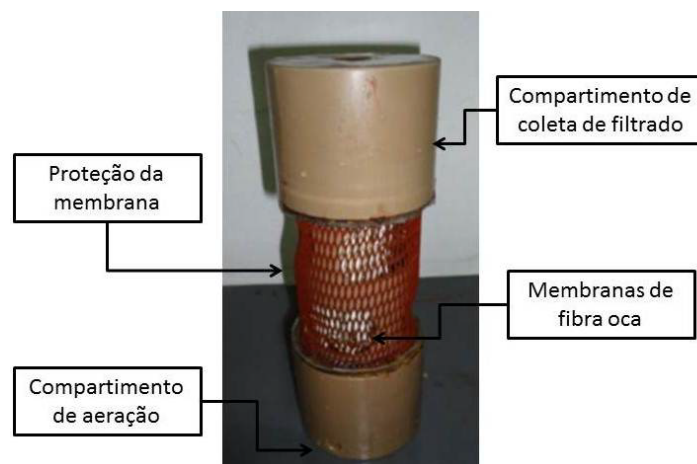


**Figura 2 - Esquema do sistema híbrido de microfiltração submersa**



**Figura 3 – Visão geral da unidade de microfiltração submersa (MFS).**

A unidade de MFS (Figura 3) era composta pelo tanque de filtração, pelo tanque extravasor e por 2 tanques de filtrado. O tanque de filtração, primeira etapa da unidade de MFS, recebia a água efluente da etapa de floculação. O módulo de membranas de MF estava localizado no interior desse tanque e consistia de uma estrutura de PVC para o suporte das membranas, fixadas nas extremidades por uma resina específica. Cada extremidade possuía um compartimento: na extremidade inferior, o compartimento de aeração e na superior, o compartimento de coleta de filtrado, onde o líquido que permeava pelas membranas era acumulado para conseguinte sucção por meio de vácuo. A Figura 4 ilustra o módulo de MF.



**Figura 4 – Detalhamento do módulo de MF**

As membranas utilizadas eram cilíndricas, do tipo fibra oca, de polieterimida, com diâmetro externo de 75 mm e tamanho dos poros de 0,4  $\mu\text{m}$ . Os quatro módulos de membranas utilizados apresentavam área de filtração variando de 0,1 a 0,3  $\text{m}^2$ , permeabilidade entre 111,7 e 186,2  $\text{LPH}/\text{m}^2\cdot\text{bar}$  e empacotamento entre 266 e 798  $\text{m}^2/\text{m}^3$ .

O desenvolvimento de cada experimento utilizando o sistema híbrido de MFS incluía a seguinte rotina experimental: preparação do sistema de MFS, hidratação/verificação da permeabilidade da membrana, correção do valor de pH da AB, experimentos de MFS propriamente ditos (duração de 4 horas) e limpeza das membranas.

Foram realizados nove (9) experimentos de MFS de fluxo contínuo em escala de bancada, com o objetivo de verificar a influência do uso ou não de coagulante, do tempo de floculação e da aeração no desempenho do processo. Essa etapa permitiu a avaliação da eficiência do sistema híbrido de MFS na remoção de turbidez, cor aparente, MON (UV 254nm), clorofila-*a*, coliformes totais e *E.coli*. Também foram monitorados a alcalinidade, a dureza e o valor de pH na água bruta e na água filtrada.

Além dos parâmetros relativos à qualidade da água, para avaliar o desempenho das membranas foram monitorados o valor da pressão transmembrana e a vazão de filtrado, uma vez que o aumento na pressão associado à redução da vazão sugere obstrução dos poros das membranas.

## RESULTADOS DOS ENSAIOS EM TESTE DE JARROS MODIFICADO

Os ensaios em teste de jarros modificado indicaram que, para a água do lago Paranoá, a eficiência de remoção de turbidez e MON (UV<sub>254nm</sub>) é alta, com o uso do sulfato de alumínio e quitosana como coagulantes.

Com relação à influência do valor do pH de coagulação, observou-se que apesar do sulfato de alumínio ter apresentado melhores resultados em relação à qualidade da água e ao tempo de filtração para o valor de pH de coagulação igual a 5, a diferença entre os residuais de turbidez e de MON para os valores de pH iguais a 5,0 e 6,5 não foi representativa. Com o uso da quitosana, verificou-se melhores resultados com relação à absorvância em UV<sub>254nm</sub> e tempo de filtração foram obtidos com o pH de coagulação igual a 6,5. Com o valor de pH de coagulação igual a 5, aumento significativo do tempo de filtração foi observado, indicado que nesse valor de pH a quitosana pode promover obstrução rápida da membrana, tornando o processo menos atrativo.

Na avaliação das dosagens de coagulantes, verificou-se que a dose ótima de sulfato de alumínio para os valores de pH de coagulação de 5,0 e 6,5 foi de 6mg/L, pois essa dose além de ter proporcionado elevados percentuais de remoção de turbidez e satisfatórios resultados de MON, apresentou baixo tempo de filtração, ou seja, menor obstrução da membrana. Os resultados de qualidade da água filtrada e do tempo de filtração indicaram que a dose de quitosana mais adequada para se trabalhar com valor de pH de coagulação igual a 6,5 é de 2 mg/L.

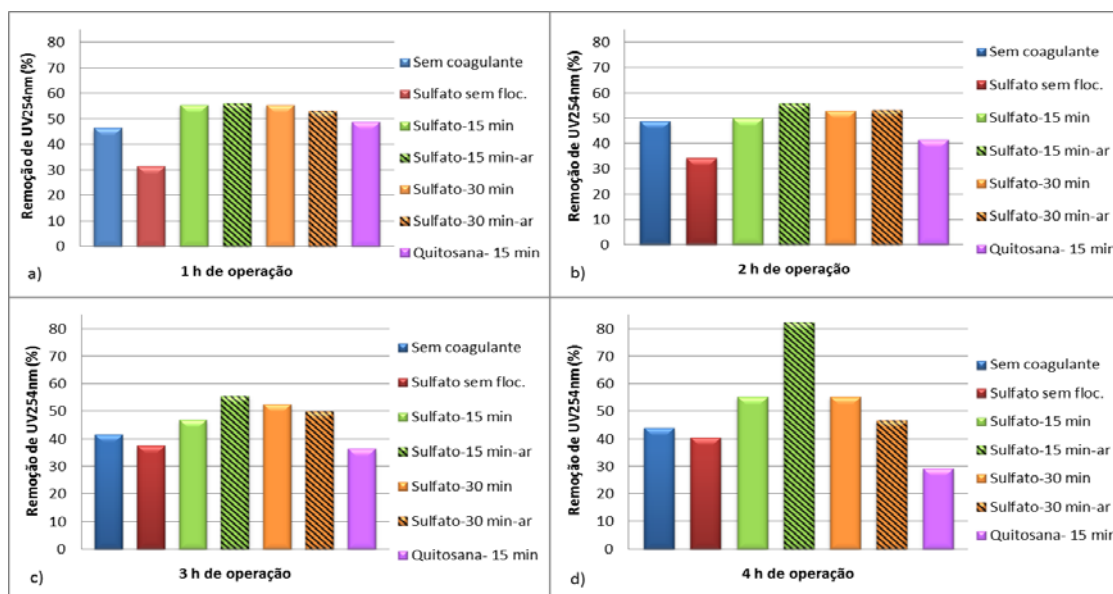
Com a análise do tempo de floculação, verificou-se que para ambos os coagulantes o tempo de floculação de 30 minutos foi o mais adequado, pois promoveu menor tempo de filtração (menor obstrução). O tempo de floculação de 15 minutos se destacou pelos resultados obtidos quanto à remoção de turbidez.

Dentre os gradientes de velocidade analisados, o de 50s<sup>-1</sup> apresentou resultados promissores nos parâmetros turbidez e tempo de filtração e resultados satisfatórios na absorvância em UV 254nm, para os dois coagulantes avaliados.

## RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS DE MFS EM ESCALA DE BANCADA

A Figura 5 apresenta os percentuais de remoção de MON (UV<sub>254nm</sub>) no decorrer do tempo de operação, levando em consideração o uso ou não de coagulante, o tempo de floculação e a presença ou não de aeração. É possível observar que, com relação à MON, o uso da MFS sem pré-tratamento resultou na deterioração do filtrado com o tempo de operação, o que ressalta a aplicabilidade do sistema híbrido de MFS. Por outro lado, os resultados obtidos com o uso do sulfato de alumínio sem etapa de floculação mostraram que a ausência de dessa etapa foi prejudicial ao desempenho da MFS, pois comprometeu a filtrabilidade da membrana.



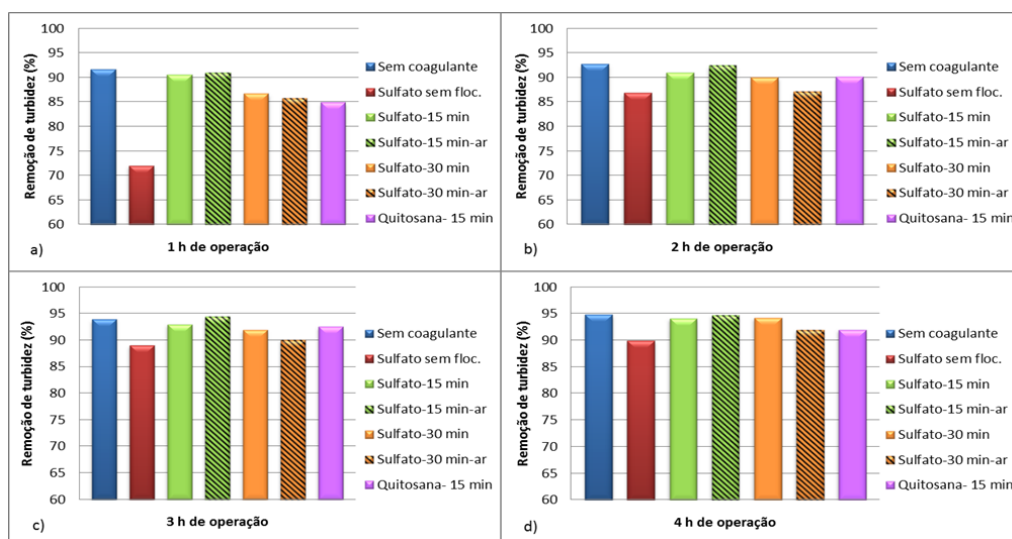


**Figura 5 – Remoção de MON (UV<sub>254nm</sub>) nas diversas condições analisadas. a) primeira hora de operação; b) segunda hora de operação; c) terceira hora de operação; d) quarta hora de operação.**

Quando comparados os resultados do uso do sulfato de alumínio com tempos de floculação de 15 e 30 minutos, sem a presença de aeração, observou-se que o tempo de 30 minutos promoveu resultados superiores, em decorrência do maior tamanho dos flocos formados. Entretanto, ao comparar os resultados obtidos utilizando a aeração, o tempo de 15 minutos apresentou maior vantagem, uma vez que a aeração contribuiu para o crescimento dos flocos.

Os experimentos utilizando a quitosana apresentaram resultados inferiores aos obtidos com o sulfato de alumínio, reforçando os resultados obtidos na etapa de teste de jarros. Pôde-se observar ainda um decréscimo da eficiência de remoção de MON, consequência provável do fato de que a quitosana representa uma adição de material orgânico à água.

Por fim, analisando os percentuais de remoção de MON (UV<sub>254nm</sub>) em todas as condições avaliadas apresentadas, observou-se que o uso do sulfato de alumínio com tempo de floculação de 15 minutos aliado à presença de aeração foi a combinação que apresentou os melhores resultados ao longo de todo o experimento. A Figura 6 apresenta os resultados de remoção de turbidez nos diferentes experimentos realizados.

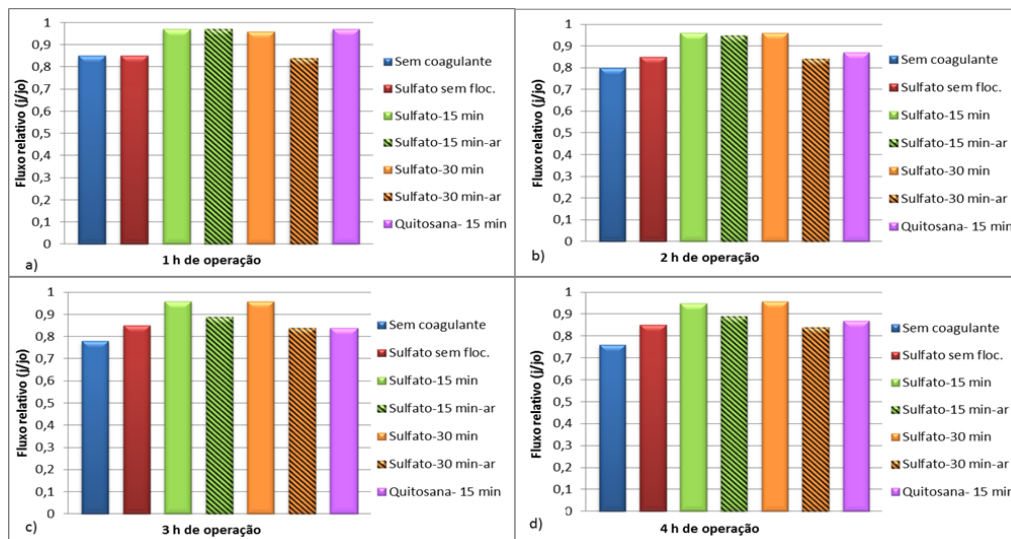


**Figura 6 – Remoção de turbidez nas diversas condições analisadas. a) primeira hora de operação; b) segunda hora de operação; c) terceira hora de operação; d) quarta hora de operação.**

Na Figura 6 é possível verificar que a menor eficiência de remoção de turbidez na MFS foi obtida quando somente a etapa de coagulação foi adotada, o que pode ser atribuído à precipitação da MON (originalmente dissolvida) pela ação do coagulante, entretanto sem formação de flocos de tamanho passível de retenção na membrana.

Independente do uso da aeração, o sulfato de alumínio apresentou resultados superiores de remoção de turbidez com adoção de tempo de floculação igual a 15 minutos e, novamente, a aeração prejudicou a qualidade da água para o tempo de floculação de 30 minutos. A água sem coagulante e o sulfato de alumínio com tempo de floculação de 15 minutos e com uso de aeração apresentaram os melhores percentuais de remoção de turbidez (> 90%). Além disso, observou-se que a quitosana promoveu resultados de remoção inferiores à quase todas as combinações utilizando o sulfato de alumínio.

A Figura 7 apresenta o comparativo entre os valores de fluxo relativo (permeabilidade verificada -J / permeabilidade inicial - Jo) no decorrer do tempo de operação. Verificou-se que a adoção da coagulação e floculação conferiu maior permeabilidade à membrana, particularmente com relação a tempos de operação mais elevados, o que já havia sido observado por Leiknes (2009) e Cho *et al.* (2006), que concluíram que a utilização do sistema híbrido não só melhora a eficiência de remoção de MON, turbidez e cor, como também minimiza as obstruções e aumenta a permeabilidade da membrana. Observou-se também que a aeração não parece favorecer a manutenção da permeabilidade com decorrer da operação e que para o tempo de 30 minutos de floculação, a adoção da aeração apresentou efeito negativo, provavelmente em função da quebra de flocos.



**Figura 7 – Fluxo relativo (j/jo – j: permeabilidade verificada e jo: permeabilidade inicial), nas diversas condições analisadas. a) primeira hora de operação; b) segunda hora de operação; c) terceira hora de operação; d) quarta hora de operação.**

## CONCLUSÕES

De modo geral, os resultados obtidos nesse estudo confirmam a aplicabilidade do sistema híbrido de microfiltração submersa no tratamento da água do lago Paranoá. A condição de aplicação do sistema híbrido de MFS ao tratamento da água do lago Paranoá que se mostrou mais promissora foi utilizando o sulfato de alumínio como coagulante, com adoção do tempo de floculação de 15 minutos na presença de aeração.

Nas condições ótimas obteve-se remoção total de cor aparente, coliformes totais e *E.coli* e eficiências médias de remoção de turbidez, MON (UV254 nm), clorofila-a, iguais a 93,2%, 62,5% e 96,2%, respectivamente, além de manutenção do fluxo de água filtrada entre 97,4% e 89,5% em relação ao fluxo com água destilada. Cabe ressaltar que os valores residuais de turbidez para esse experimento foram sempre inferiores ao valor recomendado pela Portaria MS 2.914/2011 para água pós-filtração ou pré-desinfecção, o que mostra a adequação dessa tecnologia aos níveis mais restritivos exigidos por norma.

Em resumo, a partir desse estudo constatou-se que o sistema híbrido de MFS se constitui em alternativa confiável de tratamento para a água do lago Paranoá e que o desempenho dessa tecnologia depende das condições de coagulação e floculação para a obtenção de flocos com propriedades adequadas para o processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Capelete, B.C. (2011). *Emprego da quitosana como coagulante no tratamento de água contendo microcystis aeruginosa – avaliação de eficiência e formação de trialometanos*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil. 118p.
2. Cho, M.H., Lee, C.H., Lee, S. (2006). Effect of flocculation conditions on membrane permeability in coagulation-microfiltration. *Desalination* 191 (386-396).
3. Choi, B.B., Choi, Y.J., Choi, J.S., Lee, S. e Oh, H.J. (2009). Energy management in submerged microfiltration systems by optimum control of aeration. *Desalination* 247 (233-238).
4. Hwang, K.J., Chan, C.S. e Chen, F.F. (2008). A comparison of hydrodynamic methods for mitigating particle fouling in submerged membrane filtration. *Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers* 39 (257-264).
5. Leiknes, T. (2009). The effect of coupling coagulation and flocculation with membrane filtration in water treatment: A review. *Journal of Environmental Sciences* 21 (8-12).
6. Wang, S., Liu, C., Li, Q. (2011). Fouling of microfiltration membranes by organic polymer coagulants and flocculants: Controlling factors and mechanisms. *Water Research* 45 (357-365).