

Tratamento Avançado de Efluente de Reator UASB por Membrana de Microfiltração Associado à Desinfecção por Radiação Ultravioleta

Advanced Treatment of Wastewater from UASB Reactor by Microfiltration Membrane Associated With Disinfection by Ultraviolet Radiation

André Aguiar Battistelli¹; Carlos Magno de Sousa Vidal²; Jeanette Beber de Souza³; Grasielle Soares Cavallini⁴

Resumo

A baixa eficiência dos reatores UASB, no que se refere às remoções de nutrientes, patogênicos e matéria orgânica, faz com que seja necessário o pós-tratamento, a fim de melhorar a qualidade do efluente gerado. Assim sendo, investigou-se nesse estudo a utilização da microfiltração associada à desinfecção por radiação ultravioleta como alternativa ao tratamento avançado de esgotos. Para isso, foram coletadas amostras de efluente de reator UASB a fim de realizar ensaios em sistema piloto de microfiltração, utilizando-se em uma das amostras a pré-coagulação com tanino vegetal. Posteriormente todas as amostras microfiltradas foram introduzidas em reator UV, aplicando-se doses de radiação variando de 43,8 a 194,9 mWs.cm⁻² para simular a desinfecção. O sistema empregado mostrou bons resultados em termos de remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, fósforo, NTK, ST, SST e DQO, atingindo na melhor condição operacional, os seguintes valores respectivamente: 1,90 uT, 15 uC, 10 uC, 0,94 mg/L, 17,64 mg/L, 123 mg/L, 0 mg/L e 10 mg/L, que representaram os seguintes percentuais de remoção 91,3%, 93,6%, 82,0%, 60,0%, 26,3%, 87,9%, 100% e 86,1% respectivamente. A inativação de *E. coli*, coliformes totais, colifagos e *Clostridium perfringens* obtida foi satisfatória, atingindo inativação maior que o limite de detecção do método utilizado quando submetida às maiores doses de radiação testadas. Os valores médios de fluxo de permeado variaram de 55,2 até 133,6 L.m⁻².h⁻¹.

Palavras-chave: Filtração Tangencial. Pós-tratamento de Esgoto. Inativação de Microrganismos Patogênicos.

Abstract

The low efficiency of UASB bioreactors, regarding the removal of nutrient, organic matter and pathogens, makes it necessary to carry out a post treatment, in order to improve the quality of the effluent. Accordingly, this research has examined the use of microfiltration associated to the disinfection by the ultraviolet radiation, as an option to this post treatment. For so, were collected samples of UASB reactors' effluent, in order to carry out some tests on a pilot microfiltration system, using in one of the samples pre-coagulation with vegetable tannin. After, all the microfiltrated samples were inserted in a UV reactor, applying different radiation doses, ranging from 43.8 to 194.9 mWs.cm⁻², to simulate the disinfection. The system used showed good results in terms of turbidity removal, apparent color, true color, phosphorus, nitrogen, total solids, total suspended solids and COD, reaching in the best operating condition, the following values: 1.90 uT, 15 uC, 10 uC, 0.94 mg/L, 17.64 mg/L, 123 mg/L, 0 mg/L and 10 mg/L, respectively, which represent the following removal percentages: 91.3%, 93.6%, 82.0%, 55.1%, 26.3%, 35% and 86.1%. The inactivation obtained for *E. coli*, total coliforms, colifagos and *Clostridium perfringens* was satisfactory, achieving a higher inactivation than the detection limit of the method used, when submitted to the highest tested radiation doses. The average permeate flux ranged from 55.2 to 133.6 L.m⁻².h⁻¹.

Keywords: Membrane Filtration, Post-sewage Treatment, UV Radiation.

¹ Mestrando em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina - PPGEA. andreambiental@live.com

² Docente do Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro Oeste – UNICENTRO. cacavidal@yahoo.com.br;

³ Docente do Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual do Centro Oeste – UNICENTRO. jeanette@irati.unicentro.br;

⁴ Docente do Departamento de Química Ambiental, Universidade Federal do Tocantins - UFT. grasiellesoares@gmail.com.

Introdução

O reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (UASB) é muito empregado no tratamento de esgotos sanitários devido ao baixo tempo de detenção aliado a geração de lodo mais estabilizado e em menor quantidade em comparação aos reatores biológicos aeróbios convencionais. Porém, a utilização única deste tipo de reator em muitas ocasiões não atende aos padrões de emissão exigidos pela legislação ambiental, pois o mesmo não se mostra eficiente quanto à remoção de nutrientes, patogênicos e matéria orgânica, desta forma, é necessária a complementação do tratamento.

Metcalf e Eddy (2003) definem tratamento avançado como aquele necessário para remoção de constituintes em suspensão, coloidais e dissolvidos, remanescentes do tratamento secundário convencional. Uma boa alternativa para a aplicação desse tratamento é a utilização de membranas de microfiltração, as quais efetuam a separação das fases sólida e líquida de maneira eficiente, deixando o meio líquido com baixa concentração de sólidos suspensos, microrganismos e matéria orgânica.

Segundo Schneider e Tsutiya (2001) algumas motivações para a utilização da tecnologia de membranas no setor de saneamento está associada à redução nos custos de construção e operação das unidades de tratamento, tornando esta tecnologia competitiva em relação aos sistemas convencionais usualmente aplicados para o tratamento de água e esgoto. Este autor destaca ainda as maiores eficiências alcançadas na remoção de patógenos e contaminantes químicos quando a filtração por membranas é empregada, gerando um efluente final capaz de atender a padrões de emissão cada vez mais rigorosos. Devido a essas vantagens, a tecnologia de membranas filtrantes tem sido utilizada para o pós-tratamento de esgoto sanitário em diversos países do mundo.

Ainda, Oliveira (2010) cita como vantagens dos processos por membranas, a facilidade de automação,

requerendo o mínimo de profissionais técnicos especializados para a operação, alta eficiência na remoção de microrganismos, requerendo assim baixa demanda de agentes desinfetantes, diminuindo a formação de subprodutos da desinfecção e reduzindo custos com produtos químicos.

De acordo com Vidal e Campos (2009) a fração coloidal, a qual compreende faixa de tamanho de partícula próximo ao diâmetro dos poros das membranas de microfiltração é a principal responsável na colmatação destes tipos de membranas, ocasionando, na maioria das vezes, obstrução interna dos poros. Neste tipo de colmatação, a retrolavagem, bem como o escoamento de modo tangencial, não são suficientes para remoção dessas partículas da membrana.

Segundo Al-Malack e Anderson (1996) o declínio progressivo do fluxo com o tempo não pode ser evitado e algum procedimento de limpeza ou de regeneração da membrana deve ser implementado, sendo a maioria dos procedimentos de limpeza uma combinação de limpeza hidráulica e química, dependendo das características da membrana.

Vidal e Campos (2009) aponta ainda a possibilidade da utilização de agentes coagulantes como auxiliares de filtração. A coagulação tem por objetivo reduzir as forças que tendem a manter separadas as partículas em suspensão, desestabilizando e induzindo à agregação dos colóides, diminuindo assim os efeitos da colmatação das membranas e mantendo o fluxo mais estável.

Com relação aos coagulantes, estudos têm dado destaque aos de origem natural, como o tanino vegetal. Estes compostos são biodegradáveis, levando a menores riscos à população e ao ambiente. Além disso, conforme Silva (1999) o tanino não consome alcalinidade do meio e não altera significativamente o pH, diferentemente dos coagulantes inorgânicos.

Todavia, dependendo do fim a que se destinará o efluente gerado na unidade de microfiltração, poderá ser necessária a realização de um tratamento

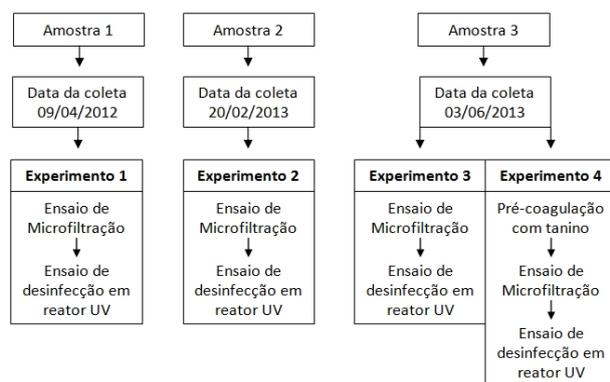
posterior, com objetivo de inativar os microrganismos patogênicos remanescentes, sobretudo, os vírus. Uma técnica que vem se mostrando altamente eficiente para esse fim é a utilização da radiação ultravioleta, a qual atua na inativação de bactérias, vírus, esporos e cistos, eliminando a necessidade de uso de produtos químicos, garantindo assim a não geração de efeitos residuais prejudiciais aos seres humanos ou à vida aquática (GONÇALVES, 2003).

O objetivo geral do presente estudo foi avaliar a aplicabilidade da microfiltração tangencial seguida de desinfecção por radiação ultravioleta para o tratamento avançado de efluente de reator UASB.

Materiais e Métodos

Para este estudo, foram coletadas amostras (1, 2 e 3) de efluente do reator UASB de uma ETE municipal; com as quais, foram realizados experimentos, descritos no fluxograma apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma dos experimentos realizados



Fonte: os próprios autores.

Para cada experimento, primeiramente foi realizada a caracterização das amostras do efluente do UASB, sendo avaliados em duplicata os seguintes parâmetros: pH, temperatura, turbidez, cor aparente, cor verdadeira, fósforo, NTK, sólidos totais, sólidos suspensos totais, DQO, coliformes totais, *E. coli*, colifagos e *Clostridium perfringens*. Logo em seguida, na primeira etapa do estudo, as amostras

1, 2 e 3 foram submetidas aos ensaios utilizando-se um sistema piloto de microfiltração operado sob filtração tangencial. A membrana utilizada no experimento é do tipo tubular de polipropileno, com tamanho de poro 0,2 μm e área filtrante de 0,036 m^2 . Os experimentos foram operados com pressão de 0,5 Kg/cm^2 , e vazão de alimentação de 12,0 L/min. Foram realizadas retrolavagens a cada 10 minutos para minimizar o entupimento dos poros durante o processo. O período de operação total empregado para cada ensaio de filtração foi de 180 minutos, com coleta de amostras de permeado a cada 30 minutos.

Na segunda etapa do estudo, o efluente da amostra 3 foi previamente coagulado utilizando-se um coagulante natural à base de tanino vegetal. As condições para a coagulação foram determinadas com base em estudos previamente realizados no Laboratório de Saneamento Ambiental e Qualidade da Água (DENAM/UNICENTRO), utilizando efluente com valor de pH 7,0 com testes realizados em escala de bancada (Jar-test). A dosagem de coagulante utilizada foi de 20 mg/L, o gradiente de mistura rápida de 500s^{-1} e o tempo de mistura rápida de 30s. Em seguida o efluente foi submetido aos ensaios de microfiltração utilizando as mesmas condições de operação citadas anteriormente.

Ao final do processo de microfiltração as amostras coletadas (amostra composta), tanto coaguladas, quanto não coaguladas, foram submetidas à desinfecção utilizando radiação UV realizada em reator construído em aço inox e cúpula refletora em alumínio, contendo 6 lâmpadas de 15 W cada uma, empregando-se lâmina líquida de 4,0 cm. As doses de radiação foram calculadas pelo produto da intensidade de radiação pelo tempo de exposição, de acordo com Souza et al. (2012).

O desempenho da membrana foi avaliado com base no fluxo de permeado e eficiência de remoção dos parâmetros supracitados. Já a desinfecção com radiação UV teve sua eficiência avaliada de acordo com o log de remoção dos microrganismos.

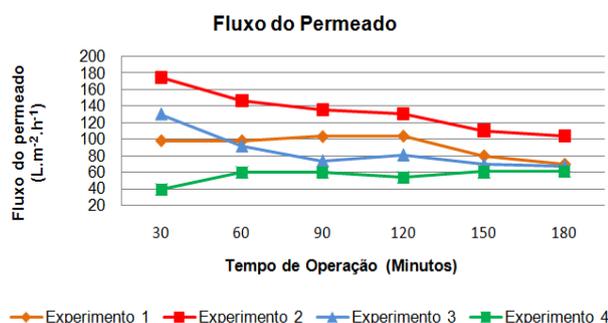
O método de quantificação de colifagos empregado foi o ensaio de placa. A metodologia seguida para o ensaio foi a Norma da CETESB/L5.225 (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 1990). Para quantificar o microrganismo *Clostridium perfringes*, foi utilizada a técnica de tubos múltiplos, seguindo a metodologia descrita na Norma CETESB/L5.213 (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL, 1993).

Resultados e Discussão

Análise do Fluxo do Permeado

Verifica-se na Figura 2 o comportamento do fluxo do permeado, obtido ao longo do tempo de operação nos quatro experimentos de microfiltração.

Figura 2 - Fluxo do permeado em relação ao tempo de operação da unidade de microfiltração.



Fonte: os próprios autores.

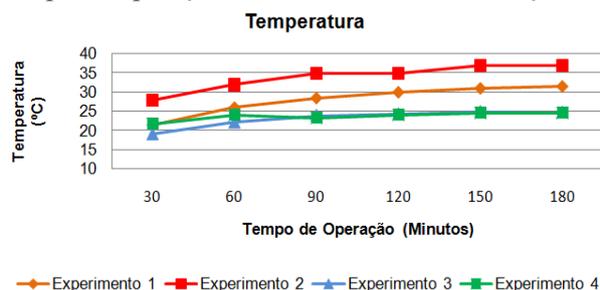
No experimento 2 obteve-se maior média de fluxo de permeado de 133,6 L.m².h⁻¹. Já nos experimentos 1 e 3 os resultados alcançados foram de 91,75 e 85,2 L.m².h⁻¹ respectivamente, mostrando-se próximo aos resultados obtidos por Vidal (2006) que realizou ensaios de microfiltração utilizando efluente de reator UASB, tendo obtido média de fluxo de permeado de 105,5 L.m².h⁻¹. Andrade et al. (2001) obtiveram fluxo de permeado de 134,0 L.m².h⁻¹ em ensaios de microfiltração tangencial com membrana possuindo diâmetro de poro de 0,2 μm, utilizando efluente de lodos ativados.

Entretanto, no experimento 4, mesmo com a utilização da etapa de pré-coagulação, uma baixa eficiência foi observada, visto que a média de fluxo obtida foi de apenas 55,2 L.m².h⁻¹. Verificou-se também (Figura 2) que nos experimentos 1, 2 e 3 os decaimentos de fluxo de permeado foram semelhantes, com declínio acentuado à partir de 120 minutos de operação, tal comportamento é devido ao início do processo de colmatação da membrana, seja por entupimento de poros ou pela formação de torta de filtro em sua superfície, que se reflete no decaimento do fluxo de permeado ao longo da filtração (JUDD, 2006).

Estudo da Temperatura

Na Figura 3 pode ser verificada a variação de temperatura com relação ao tempo de operação da unidade de microfiltração.

Figura 3 - Variação da temperatura com relação ao tempo de operação na unidade de microfiltração.



Fonte: os próprios autores.

Verifica-se na Figura 3 que a temperatura do efluente aumenta gradativamente de acordo com o tempo de operação, segundo Judd (2006) esse fato pode ser explicado pelo atrito gerado pela intensa recirculação do esgoto no sistema. Em escala plena, com escoamento contínuo, o aumento da temperatura não ocorre. No entanto, desde que a temperatura não ultrapasse os parâmetros indicados para a operação da membrana, esse aumento gradativo pode inclusive afetar positivamente no fluxo do permeado, visto que quanto maior a temperatura, menor a viscosidade

do efluente e conseqüentemente maior a permeabilidade na membrana (KRZEMINSKI et al., 2012).

Estudo dos Parâmetros Físico-químicos

Os valores de pH do efluente não variaram significativamente após a etapa de microfiltração, mantendo-se próximos ao valor encontrado para o efluente do UASB.

As concentrações de sólidos suspensos totais (SST) do efluente bruto foram de 50 mg/L para amostra 1; 32 mg/L para amostra 2 e 34 mg/L para a amostra 3. Após os ensaios de microfiltração, todas as amostras de permeado apresentaram valores de SST não mensuráveis para o método de determinação empregado, o qual consiste na filtração da amostra em papel filtro com poros de 1,2 µm. A unidade de microfiltração possui membrana com poros de aproximadamente 0,2 µm, descartando assim a possibilidade de residual de SST passíveis de retenção neste caso. Arévalo et al. (2012) estudaram o tratamento de efluentes domésticos empregando biorreator a membrana (BRM) utilizando microfiltração, obtendo residual de SST abaixo do limite de detecção utilizando o mesmo método do presente estudo.

Na Tabela 1 encontram-se os valores de sólidos totais, turbidez, cor aparente, cor verdadeira e DQO das amostras de efluente do UASB e das

amostras de permeado obtidas nos experimentos, 1, 2, 3 e 4. De acordo com os dados apresentados, as remoções de ST para os experimentos 1, 2 e 3, foram de 23,8%, 21,1% e 25,8% respectivamente, sendo que grande parte dessa remoção se deve aos sólidos suspensos, os quais foram removidos com elevada eficiência no processo. No experimento 4 a remoção de ST foi de 87,9%, atingindo-se o melhor desempenho, devido à prévia coagulação realizada, que permitiu agregação das partículas coloidais auxiliando consideravelmente na retenção dos sólidos presentes no efluente.

Os resultados de remoção de turbidez foram de 92,1%, 98,8 %, 92,5% e 91,3%, respectivamente para os ensaios 1, 2, 3 e 4. Mostrando-se semelhantes ao estudo de Ahn e Song (1999), que realizaram experimentos de microfiltração utilizando efluente de reator anaeróbio, apresentando valores médios de remoção de 99,4% desse parâmetro. Vera et al. (1997), realizando pós-tratamento de efluentes secundários de estações de tratamento de esgoto submetidos à coagulação antes de serem microfiltrados, obtiveram remoção média de 93%. A explicação para tal remoção é que a turbidez é gerada principalmente por sólidos suspensos, os quais, como já citado anteriormente, são eficientemente removidos na etapa de microfiltração

Tabela 1 - Valores médios dos parâmetros avaliados em duplicata para caracterização do efluente do UASB e do permeado da microfiltração, além das respectivas remoções alcançadas.

Parâmetro <i>Experimento</i>	Efluente UASB				Permeado				Remoção (%)			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Sólidos Totais (mg/L)	361	279	190	190	275	220	141	23	23,8	21,1	25,8	87,9
Turbidez (uT)	49,1	62,2	21,9	21,9	3,90	0,74	1,65	1,90	92,1	98,8	92,5	91,3
Cor Aparente (uC)	752	393	240	240	74	30	30	15	90,2	92,3	87,5	93,7
Cor Verdadeira (uC)	223	100	85	85	39	15	27	10	82,5	85,0	68,2	88,2
DQO (mg/L)	118	76	72	72	27	10	20	10	77,1	86,8	72,2	86,1

Fonte: os próprios autores.

A remoção de cor aparente também foi satisfatória, de 90,2%, 92,3%, 87,5% e 93,7%. A diferença de remoção quando comparada aos valores da cor verdadeira, de 82,5%, 85,0%, 68,2% e 88,2%, se deve à interferência da turbidez no resultado da primeira. Comparando-se com os resultados encontrados por Ahn e Song (1999), que realizaram experimentos de microfiltração utilizando efluente de reator anaeróbico, o presente estudo se mostrou semelhante, visto que no trabalho desses pesquisadores, a remoção de cor verdadeira alcançou média de 76,2%.

A remoção de matéria orgânica, expressa em DQO, também mostrou-se bastante eficiente, na ordem de 77,1%, 86,8 %, 72,2% e 86,1%. Andrade et al. (2001), obtiveram valores médios de remoção de DQO de 58%, em ensaios de microfiltração tangencial utilizando membrana com poro de 0,2 μm . Todavia, Bltš'áková et al. (2009), que realizaram estudos semelhantes de tratamento de efluentes domésticos utilizando membrana de microfiltração, obtiveram remoção de DQO próxima de 92%. Sun, Hay e Khor (2006) reportam ainda que o mecanismo de separação por membranas contribui significativamente para a manutenção de elevados níveis de remoção de DQO, sendo que as membranas agem como uma barreira à passagem de partículas e componentes macromoleculares ao efluente tratado.

Um fator importante a ser levado em conta é a significativa melhora do efluente, principalmente com relação à turbidez e cor, oferecendo assim melhores condições para a desinfecção por radiação ultravioleta, visto que elimina as partículas que podem vir a causar o efeito escudo que protege os microrganismos da desinfecção (BARRETO; GUIMARÃES, 2003).

Avaliação da remoção de nutrientes

A baixa eficiência do reator UASB na remoção de nutrientes faz com que ocorra a necessidade de um pós-tratamento. Verifica-se na Tabela 2 que o

uso da microfiltração possibilitou a remoção de uma parcela destes poluentes.

Tabela 2 - Concentração média (ensaios em duplicata) de Nitrogênio Total *Kjeldahl* (NTK) e de Fósforo do efluente do UASB e do permeado da microfiltração.

Parâmetro	Efluente UASB				Permeado			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Exp.								
NTK (mg/L)	62,9	47,7	23,94	23,94	31,2	31,08	22,96	17,64
Fósforo (mg/L)	5	2,48	2,1	2,1	1,16	0,81	0,85	0,84

Fonte: os próprios autores.

Os resultados de remoção de NTK foram de 50,4 % no experimento 1, 34,8 % no experimento 2, 4,1% no experimento 3 e 26,3 % no experimento 4. Nos ensaios 3 e 4 foram verificadas as menores porcentagens de remoção, provavelmente pelo efluente já apresentar um valor baixo de concentração de NTK, sendo o restante de mais difícil remoção por se apresentar principalmente na forma dissolvida. Todavia, a pré-coagulação de efluente do UASB se mostrou eficiente, pois aumentou consideravelmente a taxa de remoção quando comparado aos experimentos 3 e 4, que utilizaram a mesma amostra de efluente.

Com relação ao fósforo a remoção foi de 76,8 % no experimento 1, 67,3 % no experimento 2, 59,5% no experimento 3 e 60,0% no experimento 4. Quando comparado ao estudo de Vidal e Campos (2009), que realizou ensaios de microfiltração para o tratamento avançado de efluente do UASB, os experimentos 1, 2 e 3, se mostraram mais eficientes, pois no primeiro estudo, utilizando efluente *in natura*, o valor médio de remoção foi de apenas 45%. Contudo, quando se diz respeito ao experimento 4, com utilização de etapa de pré-coagulação, Vidal e Campos (2009) atingiu valores de remoção superiores a 90%, contra apenas 60,0% do estudo em questão.

A importância da diminuição da concentração de nutrientes no efluente a ser lançado em corpos hídricos, diz respeito principalmente ao fenômeno

da eutrofização. Para tanto existe um padrão a ser seguido pelas ETE, estabelecido pela resolução CONAMA 430/2011, na qual o limite máximo de Nitrogênio Amoniacal permitido a ser lançado no corpo hídrico é de 20 mg/L. Já com relação ao fósforo, o órgão ambiental competente poderá definir padrões específicos para o parâmetro no caso de lançamento de efluentes em corpos receptores com registro histórico de floração de cianobactérias ou em trechos onde ocorra a captação para abastecimento público.

Estudo dos Parâmetros Microbiológicos

Os efluentes de reatores UASB podem apresentar concentração elevada de microrganismos patogênicos, devido a sua baixa eficiência na remoção dos mesmos. Na Tabela 3 são apresentadas as concentrações de microrganismos indicadores de contaminação fecal presente nas amostras coletadas do reator UASB.

Tabela 3 - Caracterização das amostras (ensaios em duplicata) de efluente do reator UASB quanto aos microrganismos indicadores, CT, *E. Coli*, colifagos e *Clostridium Perfringens*.

Amostra	Concentração Inicial			
	CT	<i>E. coli</i>	colifagos	<i>Clostridium</i>
	UFC/100 mL	UFC/100 mL	UFP/100 mL	<i>Perfringens</i> NMP/100 mL
1	7,1.10 ⁶	1,6.10 ⁶	2,0.10 ⁴	1,3.10 ⁵
2	1,42.10 ⁶	4,8.10 ⁵	1,52.10 ³	3,5.10 ⁵
3	1,0.10 ⁶	2,0.10 ⁵	5,21.10 ³	3,3.10 ⁶

Fonte: os próprios autores.

Para o cálculo da inativação microbiana foi empregada a expressão $[-\text{Log}(N/N_0)]$, em que N representa o número de microrganismos após a desinfecção e N_0 o número inicial de microrganismos presentes na amostra de esgoto antes dos ensaios de desinfecção.

Na Tabela 4 são apresentadas as remoções dos microrganismos indicadores, obtidas na unidade

de microfiltração e após o sistema combinado de microfiltração seguido de exposição a diferentes doses de radiação ultravioleta. Verifica-se que a microfiltração alcançou elevada remoção dos indicadores microbiológicos estudados, atingindo, inclusive, inativação maior que o limite de detecção do método utilizado, ou seja, residual menor que 1,0 UFC/100 mL de CT nos experimentos 3 e 4, denotando inativações de 6 log. Mostrando-se mais eficiente que o estudo de Pelegrin (2004), que realizou ensaios de microfiltração utilizando efluentes de lodos ativados, tendo alcançado remoções de CT que variaram entre 3,55 e 4,71 log. Com relação ao microrganismo indicador *E. coli*, os experimentos 2 e 4, apresentaram residual menor que 1,0 UFC/100 mL, atingindo inativações superiores a 5 log. Entretanto, a remoção de vírus (colifagos) apresentou valores menores quando comparado a inativação de bactérias, isso acontece devido ao seu menor tamanho e conseqüente menor retenção na membrana.

Vale destacar também a significativa melhora na eficiência de inativação de microrganismos no ensaio 4 quando comparado ao ensaio 3, utilizando amostras de iguais características microbiológicas, isso se deve à ação do coagulante, o qual auxiliou consideravelmente na retenção de microrganismos no processo de microfiltração. A radiação UV, por sua vez, se mostrou muito eficiente, pois, de acordo com o método utilizado, as remoções dos indicadores microbiológicos CT, *E.coli* e colifagos atingiram valores maiores que o limite de detecção, quando submetidos às menores doses de radiação testadas, de 48,7, 43,8, 56,67 e 60,54, mWs.cm⁻² para as amostras dos ensaios 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Porém, a concentração do microrganismo indicador *Clostridium perfringens* somente apresentou valor menor que 1,0 NMP/100 mL, após a exposição às doses intermediárias de radiação de 97,44 e 92,3 mWs.cm⁻² para as amostras dos ensaios 1 e 2. Já para as amostras dos experimentos 3 e 4, a inativação desse microrganismo até o limite de detecção, só ocorreu quando exposto às maiores

doses de radiação testadas de 113,35 mWs.cm⁻² para a amostra do experimento 3 e 121,08 mWs.cm⁻² para a amostra do experimento 4.

Bilotta e Daniel (2012) que realizaram pesquisas de desinfecção de esgoto sanitário utilizando radiação ultravioleta, também alcançaram boa remoção de colifagos e *E. coli*, com valores entre 1,7 a 3,9 log e 1,6 a 5,2 log, respectivamente, com dosagens de

123,0 e 247,0 mW.s.cm⁻². Já o indicador *Clostridium perfringens*, assim como neste trabalho, se mostrou mais resistente à radiação, atingindo valores de inativação entre 0,0 (ausência de inativação) e 1,3 log. Souza (2006) em estudos de desinfecção de água, também verificou a dificuldade de inativação do microrganismo *Clostridium perfringens*, devido a sua alta resistência à desinfecção.

Tabela 4 - Log de inativação médio (ensaios em duplicata) de *E.coli*, CT, colifagos e *Clostridium perfringens* obtidos após a microfiltração e após o sistema combinado de microfiltração seguido de exposição a diferentes doses de radiação ultravioleta.

Experimento	Tratamento	Dose de Radiação (mWs.cm ⁻²)	Log de remoção			
			CT	<i>E. coli</i>	Colifagos	<i>Clostridium Perfringens</i>
1	Membrana	..	5,62	5,0	2,39	3,81
	UV (15 s)	48,7	6,85	6,2	4,3	3,81
	UV (30 s)	97,44	6,85	6,2	4,3	5,11
	UV (60 s)	194,9	6,85	6,2	4,3	5,11
2	Membrana	..	4,97	5,68	2,48	3,59
	UV (15 s)	43,8	6,15	5,68	3,18	3,94
	UV (30 s)	87,6	6,15	5,68	3,18	5,54
	UV (60 s)	175,2	6,15	5,68	3,18	5,54
3	Membrana	..	6,0	3,77	2,32	2,61
	UV (15 s)	56,67	6,0	5,3	3,72	3,92
	UV (30 s)	113,35	6,0	5,3	3,72	5,52
4	Membrana	..	6,0	5,3	2,41	3,29
	UV (15 s)	60,54	6,0	5,3	3,72	4,22
	UV (30 s)	121,08	6,0	5,3	3,72	5,52

Fonte: os próprios autores.

Segundo Alves, Chernicharo e Sperling (2003), baixos teores de SST no efluente refletem em melhores resultados de inativação por radiação UV, o que explica a grande eficiência do estudo em questão, pois o permeado utilizado, provindo da unidade de microfiltração apresentou baixa concentração de SST.

Conclusões

A partir dos experimentos realizados neste trabalho, foi possível concluir que:

- A unidade de microfiltração apresentou bom desempenho na remoção de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, fósforo, NTK, ST, SST e DQO, atingindo na melhor condição operacional, os respectivos percentuais de remoção: 91,3%, 93,6%, 82,0%, 60,0%, 26,3%, 87,9%, 100% e 86,1%;
- As inativações de *E. coli* e CT obtidas na unidade de microfiltração foram satisfatórias, porém, para total inativação de colifagos e *Clostridium perfringens*

foi necessária a etapa de desinfecção com radiação UV;

- A coagulação do efluente do UASB induziu a diminuição do fluxo de permeado obtido, todavia, permitiu maior retenção de partículas na membrana de microfiltração, proporcionando melhoria significativa na remoção de ST, cor aparente, cor verdadeira, DQO, NTK, *E. coli*, colifagos e de *Clostridium perfringens*.

Referências

AL-MALACK, M. H.; ANDERSON, G. K. Coagulation-crossflow microfiltration of domestic wastewater. *Journal of Membrane Science*, Amsterdam, v. 121, n. 1, p. 59-70, 1996.

AHN, K. H.; SONG, J. H. Treatment of domestic wastewater using microfiltration for reuse of wastewater. *Desalination*, Amsterdam, v. 126, n. 1, p. 7-14, 1999.

ALVES, C. V. P.; CHERNICHARO, C. A. L.; SPERLING, M. V. Desenvolvimento de sistema simplificado e de baixo custo para desinfecção de esgotos tratados biologicamente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville. *Anais...* Joinville, 2003.

ANDRADE, J. F.; ELIAS, R. J.; WOLF, D. B.; COSTA, R. H. R.; LAPOLLI, F. R. Microfiltração de efluente sanitário tratado através do processo de lodos ativados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 21., 2001, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa, 2001.

APHA. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19. ed. Washington, 1998.

ARÉVALO, J.; RUIZ, J. A.; PARADA-ALBARRACÍN, D. M.; GONZÁLEZ-PÉREZ, J. PÉREZ, B. MORENO, M. A. Wastewater reuse after treatment by MBR. Microfiltration or ultrafiltration?. *Desalination*, Amsterdam, v. 299, p. 22-27, 2012.

BARRETTO, A. S.; GUIMARÃES, J. R. Inativação fotocatalítica de bacteriófago em água: colifago. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville. *Anais...* Joinville, 2003.

BLTŠÁKOVÁ, A.; BODÍK, I.; DANČOVÁ, L.; JAKUBČOVÁ, Z. Domestic wastewater treatment with membrane filtration – two years experience. *Desalination*, Amsterdam, v. 240, n. 1, p. 160-169, 2009.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. *Determinação de colifagos em amostras de água*. São Paulo: CETESB, 1990 (Norma técnica L5/225).

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. *Clostridium perfringens: determinação de amostras de água pela técnica dos tubos múltiplos*. São Paulo: CETESB, 1993. (Norma técnica L5/213).

GONÇALVES, R. F. (Coord.). *Desinfecção de efluentes sanitários*. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP, ABES, RiMA, 2003. v. 1.

JUDD, S. *The MBR book: principles and applications of membrane bioreactors in water and wastewater treatment*. Oxford: Elsevier, 2006.

KRZEMINSKI, P.; IGLESIAS-OBELLEIRO, A.; MADEBO, G.; GARRIDO, J. M.; VAN DER GRAAF, J. H. J. M.; VAN LIER, J. B. Impact of temperature on raw wastewater composition and activated sludge filterability in full-scale MBR systems for municipal sewage treatment. *Journal of Membrane Science*, Amsterdam, v. 423, p. 348-361, 2012.

METCALF, L.; EDDY, H. P. *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

OLIVEIRA, T. F. *Tratamento de água para abastecimento público por sistema de separação por membrana de ultrafiltração: estudo de caso na ETA Alto da Boa Vista (São Paulo, SP)*. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PELEGRIN, D. C. *Microfiltração tangencial de efluente doméstico após tratamento biológico*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. *Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reúso*. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

SILVA, T. S. S. *Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em água de abastecimento e de esgoto*. 1999. 85 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 1999.

SOUZA, J. B.; VIDAL, C. M. S.; CAVALLINI, G. S.; QUARTAROLI, L.; MARCON, L. R. C. Avaliação do emprego da radiação ultravioleta na desinfecção de esgoto sanitário. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 33, n. 2, p. 117-126, 2012.

SOUZA, J. B. *Avaliação de métodos para desinfecção de água, empregando cloro, ácido peracético, ozônio e o processo de desinfecção combinado ozônio/cloro*. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

SUN, D. D.; HAY, C. T.; KHOR, S. L. Effects of hydraulic retention time on behavior of start-up submerged membrane bioreactor with prolonged sludge retention time. *Desalination*, Amsterdam, v. 195, n. 1-3, p. 209-225, 2006.

VERA, L.; LÓPES, V.; DELGADO, S.; ELMALEH, S. Cross-flow microfiltration of biologically treated wastewater. *Desalination*, Amsterdam, v. 114, p. 65-75, 1997.

VIDAL, C. M. S. *Avaliação da microfiltração tangencial como alternativa de tratamento avançado de efluente de reator UASB seguido de tanque de aeração*. 2006. 213 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

VIDAL, C. M. S.; CAMPOS, J. R. Coagulação associada à microfiltração para o tratamento avançado de esgoto sanitário. *Ambiência: Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais*, Cascavel, v. 5, n. 1, p. 101-114, 2009.

Recebido em 8 Setembro, 2014 – Received on September 8, 2014
Aceito em 28 Outubro, 2015 – Accepted on October 28, 2015