

I-002 – ELETROFLOTO-FILTRO PARA FINS DE REMOÇÃO DE CIANO BACTÉRIAS EM ÁGUAS DE CONSUMO HUMANO

Thyara C. Martins Nonato⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pelo Centro Universitário Dinâmica das Cataratas. Mestre em Engenharia Química pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (PPGEA/UFSC). Pós-Doutoranda em Engenharia Ambiental no PPGEA/UFSC.

Tiago Burgardt

Engenheiro Ambiental e Sanitarista pela Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL). Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Doutorando em Engenharia Ambiental no PPGEA/UFSC.

Alcione A. de Almeida Alves

Engenheira Ambiental pelo Centro Universitário Dinâmica das Cataratas. Mestre em Engenharia Química pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE). Doutora em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (PPGEA/UFSC). Professora Adjunta da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS).

Maurício Luiz Sens

Engenheiro Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Doutor em Tratamento de Água pela Ecole Nationale Supérieure de Rennes, da Université de Rennes I (França). Pós-doutorado em remoção de cianobactérias e cianotoxinas pela Universidade de Limoges (França). Professor Titular da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Endereço⁽¹⁾: Campus Universitário UFSC/CTC, s/n - Trindade - Florianópolis - SC - CEP: 88040-900 - Brasil - Tel: (48) 3721-9883 - e-mail: thyaranonato@outlook.com

RESUMO

A problemática da presença de florações de cianobactérias em águas de abastecimento tem sido reportada no mundo todo. As células de cianobactérias são de difícil remoção em sistemas de tratamento convencionais. Dessa forma, o objetivo desta pesquisa é o estudo da remoção de cianobactérias em águas de consumo humano por meio da aplicação do processo de eletroflotação como pré-tratamento à filtração granular descendente. Para isso, foi utilizada a água do manancial Lagoa do Peri, localizado em Florianópolis/SC. O desempenho do sistema piloto foi determinado por meio da remoção de células de cianobactérias na água tratada. De acordo com os resultados obtidos, o reator eletroquímico operou com taxa de entrada da água de $100,84 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e densidade de corrente elétrica de $68,26 \text{ A m}^{-2}$. Nessas condições, durante as 12 horas de tratamento, a remoção média de cianobactérias da água foi de aproximadamente 83% (252.185 cel/mL) para o processo de eletroflotação e de aproximadamente 58% (105.323 cel/mL) após a filtração granular descendente. Com a combinação dos processos estudados, obteve-se uma remoção média de cianobactérias inicial ($1.520.700 \text{ cel/mL}$) de mais de 93% (105.323 cel/mL), com um consumo de energia do reator eletroquímico de $1,28 \text{ kWh m}^{-3}$. Esses resultados encorajam a aplicabilidade do processo de eletroflotação como uma alternativa de pré-tratamento à filtração granular descendente para a remoção de cianobactérias em águas de consumo humano.

PALAVRAS-CHAVE: Cianobactérias, Eletrodos DSA[®], Filtração Granular Descendente, Tratamento de Água.

INTRODUÇÃO

A elevada presença de cianobactérias nos mananciais de abastecimento público causa problemas operacionais nas estações de tratamento de água, pois dificulta os processos de coagulação, floculação e sedimentação, além de promover a redução da carreira de filtração, proporcionando consequências negativas sobre a eficiência e custo do tratamento de água. Entretanto, a principal preocupação com o aumento da ocorrência de florações de cianobactérias está relacionada à capacidade que esses microrganismos têm de produzir e liberar para o meio líquido toxinas (cianotoxinas), que podem afetar tanto a saúde humana quanto animal.

No Brasil, a ocorrência de florações de cianobactérias tem sido relatada com frequência, em diferentes regiões do país, inclusive em mananciais utilizados para abastecimento público, em função das características ambientais favoráveis ao desenvolvimento e à proliferação destes microrganismos durante todo o ano (AZEVEDO et al., 2002).

A água da Lagoa do Peri, localizada na ilha de Florianópolis/SC é utilizada para abastecimento de parte da população do Sul e Leste dessa ilha, após tratamento por meio de filtração direta. Uma característica peculiar da água dessa lagoa é a presença de altas concentrações de cianobactérias, predominantemente *Cylindrospermopsis raciborskii* e *Pseudanabaena galeata*, ambas filamentosas, produtoras de hepatoxinas e neurotoxinas que causam intoxicações agudas e crônicas, atingindo as células do fígado e sistema neuromuscular, podendo levar à morte de animais em minutos, horas ou dias (MONDARDO et al., 2006).

Por se tratar de uma cianobactéria filamentosa, a sua existência na água a ser tratada é desfavorável à operação de filtros, especialmente a filtração direta, pois pode ocorrer o transpasse de células, dependendo das características do meio filtrante, reduzindo significativamente a carreira de filtração (SÁ et al., 2004), o que não é interessante para o processo de filtração. Dessa forma, para prolongar a duração da carreira de filtração, se torna necessário a aplicação de um pré-tratamento que seja capaz de remover as cianobactérias sem o rompimento celular e que seja de baixo custo de implantação e operação.

Nesse contexto, a presente pesquisa tem como objetivo a aplicação do Eletrofloto-filtro, que consiste em uma única unidade contendo o processo de eletroflotação, utilizando eletrodos DSA[®], como pré-tratamento à filtração granular descendente na remoção de cianobactérias em águas de consumo humano.

O processo de eletroflotação com a utilização de ânodo dimensionalmente estável possibilita ampliar a capacidade de tratamento dos sistemas físico-químicos tradicionais, pois utiliza-se dos mesmos fundamentos básicos de coagulação-floculação (KATAL & PAHLAVANZADEH, 2011).

MATERIAIS E MÉTODOS

A presente pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Potabilização de Águas (LAPOA), localizado no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (ENS/UFSC), Florianópolis/SC.

SISTEMA PILOTO E ÁGUA DE ESTUDO

O sistema piloto, denominado Eletrofloto-filtro, é composto basicamente pelo filtro granular descendente, pelo reator eletroquímico, por uma fonte estabilizadora de tensão, utilizada para determinação da densidade de corrente, uma bomba centrífuga de ½ CV, utilizada para a recirculação da água, uma bomba dosadora, utilizada para controle da vazão de entrada da água bruta, sistemas hidráulicos e elétricos e por dois reservatórios de 500 L de capacidade (entrada/saída), conforme apresentado na Figura 1.

O filtro granular descendente consiste em duas colunas de acrílico de 0,115 m de diâmetro interno e 1 m de comprimento cada. O meio filtrante é composto por uma camada de 0,40 m de areia com diâmetro efetivo (D10) de 0,58 mm e coeficiente de uniformidade (CU) de 1,59 e camada suporte de 0,25 m de seixo rolado, com granulometria variando de ¼" a ¼".

Entre as colunas do filtro foi inserido o reator eletroquímico que possui 115 mm de diâmetro interno e um volume útil de 2,08 L. Os eletrodos utilizados são compostos por cátodos de titânio e ânodos dimensionalmente estáveis do tipo DSA[®], compostos por Ti/Ru_{0,3}Ti_{0,7}O₂. Foi utilizado um arranjo de 10 eletrodos em paralelo, sendo 5 cátodos e 5 ânodos dispostos alternadamente, com área efetiva total de 785 cm² e distância entre os eletrodos de aproximadamente 0,8 cm.

A água bruta foi coletada no canal de chegada da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Lagoa do Peri e transportada ao laboratório para a realização dos experimentos. Os procedimentos de coleta e preservação da água seguiram as recomendações estabelecidas pela *American Public Health Association* (APHA, 2012).

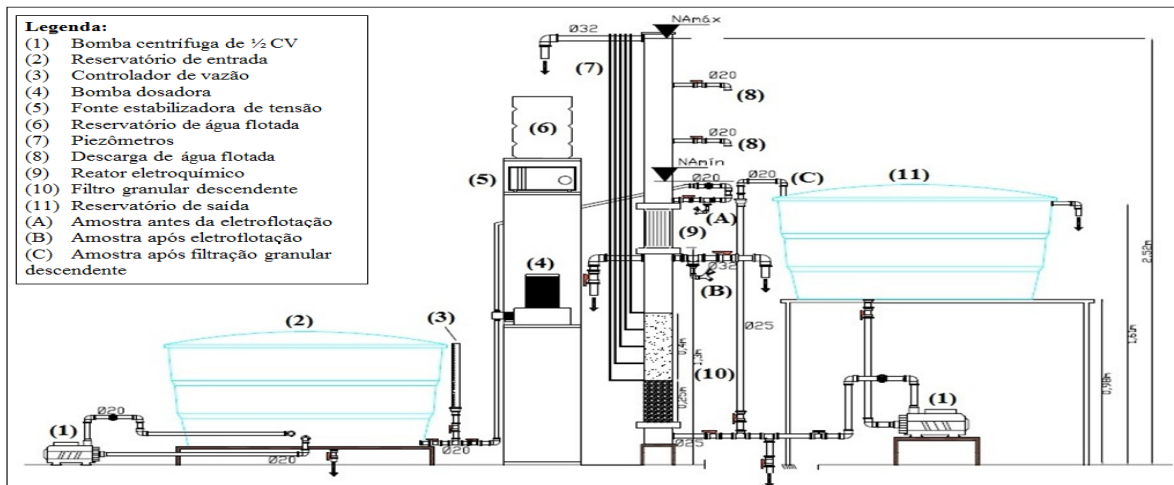


Figura 1: Esquema do sistema piloto utilizado na pesquisa (Eletrofloto-filtro).

PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para identificar as melhores condições dos parâmetros operacionais do reator eletroquímico (PORE), foram realizados testes preliminares nos quais a água foi tratada a temperatura ambiente sob diferentes condições, variando-se a taxa de entrada da água e a densidade de corrente elétrica. Após 30 minutos de cada ensaio, amostras de água tratada eram coletadas e realizadas as contagens de cianobactérias.

Para determinar as condições ótimas dos PORE e identificar a máxima eficiência do processo de eletroflotação, foi realizado um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) 2^2 com triplicata no ponto central e mais 4 pontos axiais, totalizando 11 ensaios. Os níveis das variáveis analisadas podem ser observados na Tabela 1. A variável resposta foi a taxa de remoção das cianobactérias.

Tabela 1: Níveis das variáveis independentes investigadas no processo de eletroflotação.

Variável independente	Variáveis	Níveis				
		-1,68	-1	0	+1	+1,68
Taxa de entrada ($\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$)	q_1	49,6	70,0	100,0	130,0	150,4
Densidade de corrente (A m^{-2})	q_2	16,56	38,21	70,06	101,91	125,56

Os resultados obtidos no planejamento experimental foram analisados estatisticamente, sendo que esta análise compreende a análise de variância (ANOVA), a previsão do modelo estatístico e gráficos de contorno. Para obtenção destas respostas utilizou-se o software Statistica®. Obtiveram-se dessa forma, as condições operacionais de maior desempenho do reator eletroquímico.

COMBINAÇÃO DOS PROCESSOS ESTUDADOS (ELETROFLOTO-FILTRO)

Após a obtenção das condições operacionais de maior desempenho do processo de eletroflotação, foram realizados os experimentos nos quais a água foi tratada pelo sistema piloto operando de forma combinada, verificando-se dessa forma, a eficiência da combinação dos processos estudados na remoção de cianobactérias presente na água de consumo humano.

Nessa etapa, foram realizados três ensaios com o sistema piloto operando de forma combinada, para verificação da repetitividade dos experimentos. Durante cada ensaio realizado, foram coletadas amostras de água antes do processo de eletroflotação, após o processo de eletroflotação e após a filtração granular descendente. Essas coletas foram realizadas a cada 60 minutos de tratamento para a realização da análise de contagem de cianobactérias presentes na água. As análises de contagem de cianobactérias foram realizadas de acordo com os procedimentos descritos no método 10900 C do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). O tempo de duração de cada ensaio realizado com o sistema piloto

operando de forma combinada foi de acordo com a perda de carga máxima no filtro, que é de 0,87 m, aferida por meio de piezômetros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

RESULTADOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

O planejamento experimental utilizado para a interação entre todas as variáveis e níveis, e os resultados obtidos na remoção de cianobactérias da água pelo processo de eletroflotação são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Condições experimentais e resultado do DCCR 2² com triplicata no ponto central e mais 4 pontos axiais, para a remoção (%) de cianobactérias da água utilizando o processo de eletroflotação para 30 minutos de eletrólise.

Ensaio	Taxa de entrada (m ³ m ⁻² d ⁻¹)	Densidade de corrente (A m ⁻²)	Remoção de cianobactérias (%)
1	70	38,21	34,63
2	130	38,21	53,41
3	70	101,91	40,12
4	130	101,91	32,55
5	49,6	70,06	27,30
6	150,4	70,06	23,65
7	100	16,56	28,13
8	100	125,56	25,25
9	100	70,06	69,79
10	100	70,06	72,16
11	100	70,06	70,50

De acordo com a Tabela 2, a remoção de cianobactérias variou de 23,65 a 72,16%, considerando todos os efeitos das variáveis independentes e suas interações, dentro da faixa experimental estudada nesta pesquisa.

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente combinando as ações entre as variáveis, utilizando o modelo proposto apresentado na equação 1.

$$R (\%) = 70,87 - 0,53 * X_1 - 1,50 * X_2 - 16,01 * X_1^2 - 14,97 * X_2^2 - 6,59 * X_1 * X_2 \quad \text{equação (1)}$$

Sendo $R (\%)$ a porcentagem de remoção de cianobactérias; 70,87 é uma constante; X_1 é a taxa de entrada da água (m³m⁻²d⁻¹), X_2 é a densidade de corrente elétrica (A m⁻²), X_1^2 é a taxa de entrada da água (m³m⁻²d⁻¹), X_2^2 é a densidade de corrente elétrica (A m⁻²) como termos quadráticos da equação e $X_1 * X_2$, é a interação entre os fatores.

Para validar o ajuste do modelo proposto pelos resultados obtidos foi realizada a ANOVA. Os resultados da ANOVA são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: ANOVA do modelo previsto para os valores de remoção de cianobactérias da água pelo processo de eletroflotação, ao nível de confiança de 95% ($p < 0,05$).

Parâmetro	Fontes de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Médias dos Quadrados	F		Nível de Significância (%)
					Calculado	Tabelado	
Contagem de cianobactérias	Regressão	3699,57	5	739,91	48,77	5,05	<0,01
	Resíduos	75,87	5	15,17			
	Falta de ajuste	72,91	3	24,30			
	Erro puro	2,96	2	1,48			
	Total	3775,44	10				

O resultado da ANOVA mostrou que o modelo previsto (equação 1) é válido no intervalo de confiança de 95%, conforme apresentado na Tabela 3. Sendo o $F_{\text{calculado}} (48,77) > F_{\text{tabelado}} (5,05)$, pode-se afirmar que os valores das respostas experimentais ($R\%$) resultaram em uma boa reprodução dos dados. O valor do resíduo (75,87) foi baixo quando comparado com a regressão (3699,57), e o valor do erro puro (2,96) indica uma boa reprodutibilidade da análise.

De acordo com a análise estatística e a interpretação dos resultados obtidos, a maior eficiência do processo de eletroflotação na remoção de cianobactérias é alcançada nas seguintes condições operacionais do reator eletroquímico: $100,84 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ de taxa de entrada da água e $68,26 \text{ A m}^{-2}$ de densidade de corrente elétrica. Esses resultados podem ser melhores visualizados na Figura 2, quando em função das respostas obtidas no planejamento experimental, foi construído o gráfico de contorno utilizando o modelo estatístico proposto.

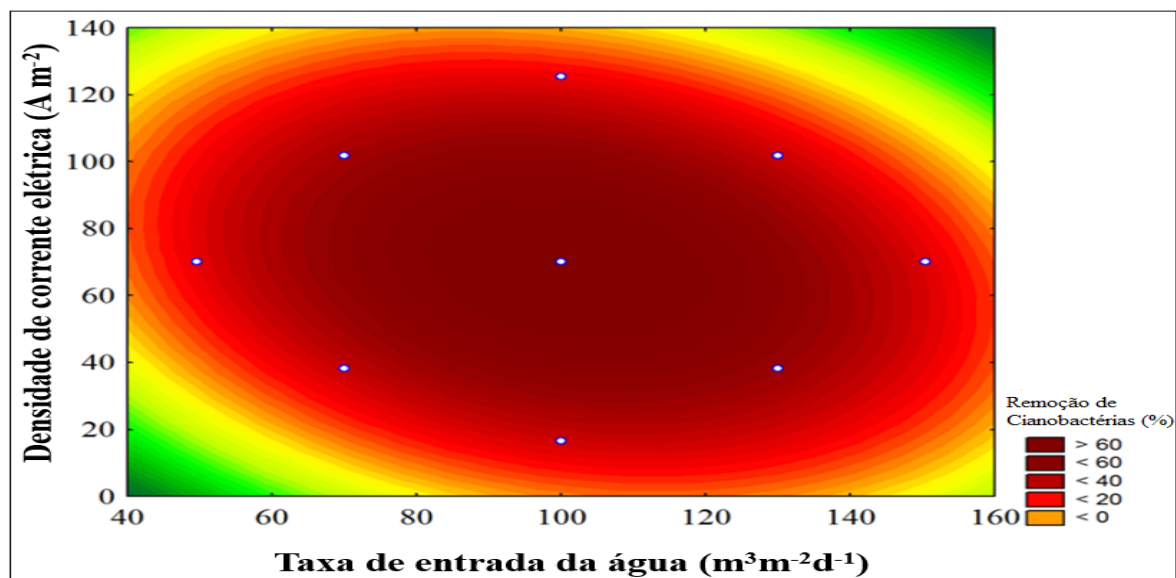


Figura 2: Gráfico de contorno para avaliação da remoção de cianobactérias em função da taxa de entrada da água e da densidade de corrente elétrica.

Na Figura 2 observa-se que os ensaios no ponto central (0) foram os ótimos de resposta, ou seja, os maiores percentuais de remoção de cianobactérias ocorreram quando os valores da taxa de entrada da água e da densidade de corrente elétrica estavam próximos aos valores centrais do planejamento experimental.

Pode-se observar também que o aumento da taxa de remoção de cianobactérias com a densidade de corrente elétrica a valores próximos do ponto central ocorre em virtude do aumento da quantidade de bolhas de gás que são geradas no processo de eletroflotação, possibilitando uma maior eficiência na remoção de cianobactérias. Em estudo semelhante, Lucero e colaboradores (2016) também observaram que a densidade de corrente elétrica é um parâmetro fundamental no processo de eletroflotação, pois tem efeito direto na remoção de cianobactérias.

Observa-se que valores de densidade de corrente elétrica acima do ponto central do planejamento experimental não terão qualquer efeito significativo no que se refere à eficiência de remoção de cianobactérias. Aumentar a densidade de corrente elétrica a partir desse ponto, só aumentará o consumo de energia, mas não a eficiência de remoção, portanto, não é uma opção viável. A desaceleração da remoção de cianobactérias além de $68,26 \text{ A m}^{-2}$ ocorre, provavelmente, devido a grande quantidade de bolhas de cloro que é produzida, uma vez que o excesso de bolhas de cloro reduz a eficiência da taxa de remoção, devido a coalescência das bolhas (HOSNY, 1996).

RESULTADOS DA COMBINAÇÃO DOS PROCESSOS ESTUDADOS (ELETROFLOTO-FILTRO)

Para o processo de eletroflotação operando nas condições ótimas: taxa de entrada da água de $100,84 \text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e densidade de corrente elétrica de $68,26 \text{ A m}^{-2}$, seguido pelo processo de filtração granular descendente, foram obtidos resultados satisfatórios de remoção de cianobactérias da água.

Os ensaios tiveram uma duração de 12 horas cada. As médias das triplicatas dos valores da contagem de cianobactérias obtidas após o processo de eletroflotação e após a filtração granular descendente podem ser observadas na Figura 3.

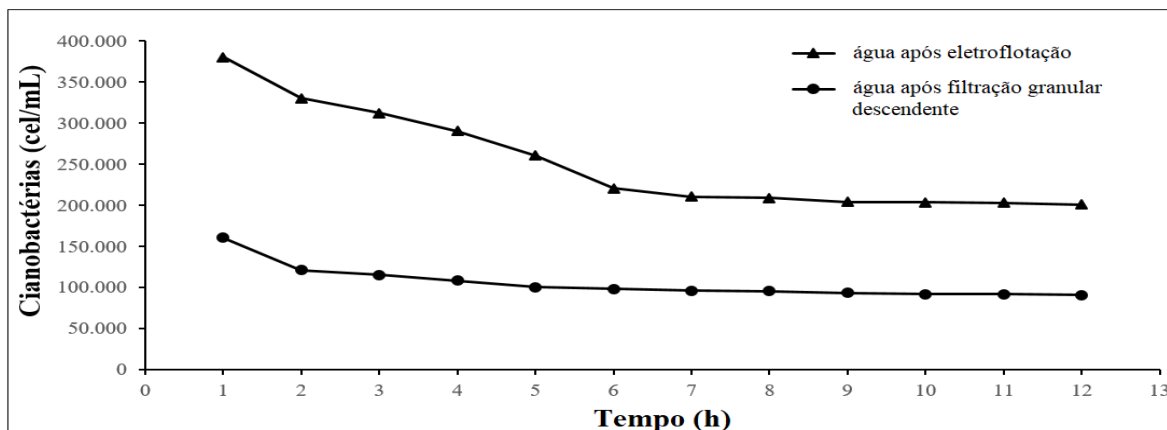


Figura 3: Médias das triplicatas dos valores da contagem de cianobactérias obtidas após o processo de eletroflotação e após a filtração granular descendente.

Observa-se na Figura 3 que na primeira hora de tratamento houve uma remoção de aproximadamente 75% (380.400 cel/mL) do número total (1.520.700 cel/mL) de células de cianobactérias após o processo de eletroflotação e mais de 57% (160.500 cel/mL) após a filtração, totalizando um percentual de remoção de células de cianobactérias de mais de 89% após a combinação dos processos (Eletrofloto-filtro). A partir das primeiras 6 horas de tratamento observa-se uma tendência linear dos pontos experimentais de remoção de cianobactérias. A remoção média de células de cianobactérias após o processo de eletroflotação foi de 83,42% (252.185 cel/mL) e após a filtração foi de 57,59% (105.323 cel/mL). O percentual médio de remoção de células de cianobactérias com o sistema piloto operando de forma combinada foi de 93,07%, com um consumo de energia do reator eletroquímico de 1,28 kWh m⁻³. Esse valor de consumo de energia foi semelhante ao valor obtido por Tumsri e Chavalparit (2011).

Tumsri e Chavalparit (2011) estudaram o processo de eletroflotação para remoção de algas utilizando ânodos de alumínio e cátodos de grafite. Os autores observaram que para uma densidade de corrente de 20 A m⁻² e 60 minutos de eletrólise foi obtida uma eficiência de remoção de 96,0 - 98,1%. Nessas condições, o consumo de energia foi de 1,84 kWh m⁻³.

Garcia e colaboradores (2014) estudaram a remoção de cianobactérias de águas de abastecimento através do processo de eletroflotação seguido de filtração e obtiveram uma remoção média de 76,3% após o processo de eletroflotação e de 100% após o processo de filtração. Ressalta-se que neste trabalho os autores utilizaram para a filtração (em descontinuo) papel filtro (Whatman GR 40).

Observou-se ainda, que a eletroflotação pode ser uma opção atrativa como pré-tratamento à filtração granular descendente, pois além de proporcionar uma ampla aplicação sem o desgaste dos eletrodos (TRASATTI, 2000), promoveu uma remoção acima de 83% das cianobactérias presentes em águas de consumo humano. A eletroflotação ainda de destaca entre outros métodos de remoção de cianobactérias por seus benefícios econômicos e ambientais (LUCERO JR et al., 2016).

CONCLUSÕES

Apesar da água do manancial Lagoa do Peri ser de difícil tratamento por apresentar elevadas concentrações de cianobactérias, o processo de eletroflotação demonstrou ser uma opção atrativa como pré-tratamento à filtração granular descendente.

Com o reator eletroquímico operando com taxa de entrada da água de 100,84 m³m⁻²d⁻¹ e densidade de corrente elétrica de 68,26 A m⁻², durante 12 horas de operação do sistema piloto, houve uma remoção média de cianobactérias de 83,42% e após a filtração a remoção foi de 57,59%. O percentual médio de remoção de

células de cianobactérias com o sistema piloto operando de forma combinada foi de 93,07%, com um consumo de energia do reator eletroquímico de 1,28 kWh m⁻³.

Portanto, conclui-se que o tratamento da água do manancial Lagoa do Peri pelo processo de eletroflotação, utilizando eletrodos do tipo DSA[®], foi eficiente e pode ser utilizado como método de pré-tratamento à filtração granular descendente para a remoção de cianobactérias em águas de consumo humano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZEVEDO, S.M.F.O., CARMICHAEL, W.W., JOCHIMSEN, E.M., RINEHART, K.L., LAU, S., SHAW, G.R., EAGLESHAM, G.K. *Human intoxication by microcystins during renal dialysis treatment in Caruaru-Brazil. Toxicology*, v.181-182, n.0, p. 441-446, 2002.
2. GARCIA, T.V., SENS, M.L., MONDARDO, R.I. *Remoção de microalgas e cianobactérias por eletroflotação seguido de filtração. Saneamento Ambiental*, v.XXII, n.174, p. 24-29, 2014.
3. HOSNY, A.Y. *Separating oil from oil-water emulsions by electroflotation technique. Separations Technology*, v.6, n.1, p. 9-17, 1996.
4. KATAL, R., PAHLAVANZADEH, H. *Influence of different combinations of aluminum and iron electrode on electrocoagulation efficiency: Application to the treatment of paper mill wastewater. Desalination*, v.265, n.1-3, p. 199-205, 2011.
5. LUCERO JR, A., DONG-SEOG, K., YOUNG-SEEK, P. *Effect of Operational Parameters on the Removal of Microcystis aeruginosa in Electro-flotation Process. Journal of Environmental Science International*, v.25, n.10, p. 1417-1426, out. 2016.
6. MONDARDO, R.I., SENS, M.L., FILHO, L.C. De M. *Pré-tratamento com cloro e ozônio para remoção de cianobactérias. Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.11, n.4, p. 337-342, out/dez. 2006.
7. SÁ, J.C., CELIA, C., BRANDÃO, S. *Influência do diâmetro efetivo da areia na eficiência da filtração lenta no tratamento de águas contendo Microcystis aeruginosa. CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 2004. Anais. San Juan, Costa Rica, 2004.*
8. *Standard methods for the examination of water and wastewaters, 22nd edn, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environmental Federation, Washington DC, USA, 2012.*
9. TRASATTI, S. *Electrocatalysis: understanding the success of DSA[®]. Electrochimica Acta*, v.45, n.15-16, p. 2377-2385, 2000.
10. TUMSRI, K., CHAVALPARIT, O. *Optimization Electrocoagulation-electroflotation Process for Algae Removal. 2nd International Conference on Environmental Science and Technology IPCBEE 6, v2-452-v2-456, 2011.*