



APLICAÇÃO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO/FLOTAÇÃO PARA REUSO DE ÁGUA PLUVIAL



APPLICATION OF ELETROCOAGULATION / FLOTATION PROCESS FOR RAINWATER REUSE

CARVALHO, Andrew Henrique de Sousa^{1*}; CUBA, Renata Medici Frayne²; Carvalho, Ricardo Valadão de³;
MARRA, Enes Gonçalves⁴

^{1,2,3,4} Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil e Ambiental, e Escola de Engenharia Elétrica
Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária Av. Universitária, 1488, Q. 86, L. Área
Setor Universitário cep 74605-220, Goiânia – GO, Brasil
(fone: + 55 62 3209-6267)

* Autor correspondente
e-mail: carvalhoandrew@gmail.com

Received 09 April 2018; received in revised form 27 June 2018; accepted 11 July 2018

RESUMO

A eletrocoagulação de matrizes aquosas vem ganhando considerável atenção devido a versatilidade e bons resultados obtidos. Avaliou-se a tratabilidade de água de chuva por meio da eletrocoagulação/flotação em reator cilíndrico com eletrodos de alumínio. O procedimento experimental foi conduzido em reator em escala-piloto, operado em fluxo contínuo com tempo de detenção hidráulica de 100 segundos e densidade de corrente de 12,3 mA/cm². O reator foi construído com tubo de acrílico nas dimensões de 8 cm de diâmetro e 60 cm de altura, sendo os eletrodos feitos com tubo de alumínio com 15 cm de altura. Para avaliar o grau de tratabilidade da água de chuva foram realizadas análises de pH, turbidez, cor, cloretos, sílica, dureza, alcalinidade, condutividade, sólidos suspensos e dissolvidos e demanda química de oxigênio. Os resultados foram comparados ABNT NBR 15527, a Portaria 2914 e a norma da ASME para água de caldeiras, sendo que com exceção do parâmetro dureza, os demais atenderam as normas. Tais resultados mostraram o custo benefício da eletrocoagulação/flotação, que apresentou o gasto de R\$ 0,30 por metro cúbico de água tratada.

Palavras-chave: *Tratamento eletroquímico, Água com baixa condutividade, Reuso*

ABSTRACT

The electrocoagulation of aqueous matrices has been gaining considerable attention because of the versatility and good results obtained. The treatability of rainwater was evaluated by means of electrocoagulation/flotation in cylindrical reactor with aluminium electrodes. The experimental procedure was conducted in pilot-scale reactor, operated in continuous flow with hydraulic detention time of 100 seconds and 12.3 current density mA/cm². The reactor was built with acrylic tube on the dimensions of 8 cm in diameter and 60 cm in height, being the electrodes made with aluminum tube with 15 cm high. To assess the degree of treatability of rainwater were carried out analyses of pH, turbidity, color, chlorides, silica, hardness, alkalinity, conductivity, suspended solids and dissolved and chemical oxygen demand. The results were compared ABNT NBR 15527, Portaria 2914 and the ASME standard for boiler water, being that with the exception of the hardness, the other answered. These results showed the cost benefit of electrocoagulation/flotation, which showed spending US\$ 1.12 per cubic meter of treated water.

Keywords: *Electrochemical treatment, Water with low conductivity, Reuse*

INTRODUÇÃO

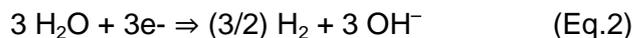
O Brasil é o país com a maior reserva de água doce do mundo, e esse dado remete a ideia de abundância que vem sendo levada de forma irresponsável em relação a conservação dos recursos hídricos. Essa reserva, além de não ser uniforme, localizando-se majoritariamente na região amazônica, é influenciada pelo regime de chuvas. A região Nordeste, tradicionalmente enfrenta um regime seco, e de forma eventual, outras regiões são afetadas, como o Sudeste que em 2014 enfrentou uma grave crise hídrica, como discutido por Martins (2014), servindo de alerta a falta de gestão relacionada ao planejamento e desperdício de água no estado de São Paulo.

A água pluvial é uma fonte de água que se gerenciada e tratada de forma adequada, seria uma reserva importante para as épocas de estiagem e preservação dos corpos hídricos e subterrâneos. No Japão o aproveitamento de águas pluviais é incentivada desde a década de 90 (JFS, 2018). Já no Brasil, a legislação relacionada ao reuso de água, principalmente pluvial, ainda é muito limitada. Em 2017 foi incluída a Lei Nº 13.501 (BRASIL, 2017), de 30 de outubro de 2017, na Política Nacional de Recursos Hídricos que preconiza o incentivo captação, preservação e o aproveitamento de águas pluviais. Entretanto, a única norma brasileira que estabelece padrões de qualidade é a ABNT NBR 15527, para fins não potáveis.

A adequação da qualidade da água para um determinado fim demanda a aplicação de tecnologias eficientes que atendam os parâmetros preconizados por cada legislação. A eletrocoagulação/flotação (ECF) é uma tecnologia não convencional de tratamento, que vem recebendo destaque devido à sua eficiência e versatilidade em uma gama variada de matrizes aquosas (GARCIA-SEGURA *et al.*, 2017; KOBYA *et al.*, 2011; NAJE; ABBAS, 2015).

A ECF é um método que associa três tecnologias, a flotação, coagulação e eletroquímica. Faz uso de no mínimo um par de eletrodos, constituídos por chapas metálicas, em geral de alumínio ou ferro, sendo conectados em uma fonte elétrica. A passagem de corrente elétrica promove a corrosão do eletrodo (ânodo), seguido da formação de hidróxidos metálicos que promovem a coagulação eletrolítica seguida da flotação realizada pela formação de bolhas de hidrogênio e oxigênio, geradas no processo

(MOUSSA *et al.*, 2017). Segundo Kobya *et al.* (2006) as principais reações eletroquímicas são a liberação do cátion metálico do ânodo na solução, representado pela Equação 1, e da evolução do gás hidrogênio no cátodo, representado pela Equação 2.



Os estudos que abordam a utilização da ECF aplicada a água bruta ou pluvial é limitado, em grande parte devido a condutividade elétrica baixa dessas matrizes, o que pode conferir a um maior gasto energético, pela tensão elétrica demandada ser maior (MOHORA *et al.*, 2012; ULU *et al.*, 2015). Porém, os reatores utilizados nessa tecnologias estão apresentando designs compactos, com geometria dos eletrodos otimizada de forma que a resistência elétrica da solução minimiza os efeitos da baixa condutividade (GARCIA-SEGURA *et al.*, 2017).

Dessa forma, o presente trabalho teve por objetivo verificar a eficiência no tratamento de água pluvial com um modelo de reator vertical com eletrodos em tubos cilíndricos proposto, comparando a qualidade do tratamento com a ABNT NBR 15527 (ABNT, 2002), Portaria 2914 (BRASIL, 2011) e ASME apresentado por Frayne (2002).

MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Concepção do Reator

O reator de eletrocoagulação foi feito em tubo de acrílico de 80 mm de diâmetro com 60 cm de altura, onde foi fixado em uma mesa metálica quadrada de 30 cm de aresta, com 50 cm de altura. Os eletrodos usados foram tubos de alumínio de 1" e 1,5" de diâmetro por 15 cm de comprimento, sendo os mesmos dispostos em um adaptador com flanges e cap de pvc de 50".

A Figura 1 apresenta uma imagem do reator com uma ilustração do corte transversal da estrutura do eletrodo conforme indicado pela seta, em que o afluente é injetado em um tubo, que leva a água para uma câmara interna, dentro do cap de pvc. Dessa câmara a água passa pelos eletrodos, sendo o ânodo o cilindro interno e o cátodo o cilindro de alumínio externo direcionando a água para o tubo de acrílico. Os eletrodos são conectados por fios de alumínio ligados em dois pinos também de alumínio, que possuem contato com o lado externo do reator,

onde são ligados a fonte elétrica de alimentação. A parte interna do ânodo é vedada, de forma que não há entrada de água.

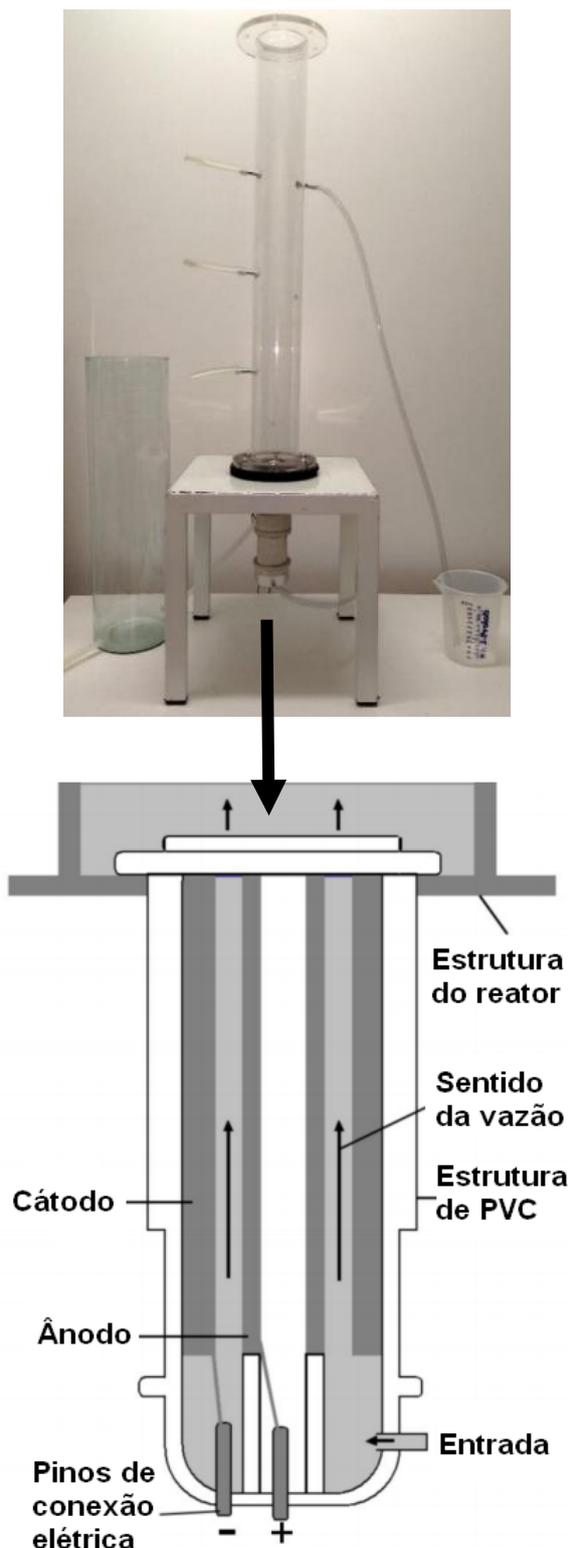


Figura 1. Imagem do reator seguido pelo recorte transversal da estrutura do eletrodo.

2.2 Procedimento experimental

O procedimento experimental foi conduzido em escala-piloto em fluxo contínuo com tempo de detenção hidráulica de 100 segundos, operando com a densidade de corrente de $12,3 \text{ mA/cm}^2$, sendo os eletrodos ligados a uma fonte de tensão da marca Minipa modelo MPL-3305. Foi utilizada uma bomba centrífuga da marca GM 12 V com vazão de $0,0198 \text{ L/s}$, controlada por uma fonte de tensão da marca Minipa modelo MPL-3305 onde a mesma teve o intuito de promover a equalização da vazão de entrada e saída do reator. O fluxo de escoamento adotado foi ascendente, de modo a promover a flotação de poluentes por meio do arraste garantido pelo fluxo de escoamento e da formação de microbolhas no eletrodo.

A água usada no tratamento foi obtida durante uma precipitação na cidade de Goiânia no mês de abril, época que se inicia o período de estiagem como apresentado no relatório climático de Farias (2017), sendo a mesma coletada por uma calha que a direcionava a um reservatório. O afluyente foi condicionado em um tubo de vidro com volume de 13 litros, sendo ligado a bomba centrífuga que injetava a água pelo cap de pvc, direcionando para os eletrodos.

2.2 Avaliação do tratamento

A coleta da água tratada foi realizada em triplicata, nos tempos de 2, 4 e 6 minutos de tratamento.

Os parâmetros físico-químicos avaliados para verificar a qualidade da água pluvial foram o pH, demanda química de oxigênio (DQO) turbidez, cor aparente, sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, dureza, sílica, alcalinidade, condutividade e cloretos seguindo as metodologias presentes em APHA (2012). Os resultados foram comparados com a norma ABNT NBR 15527 (ABNT, 2002), Portaria 2914 (BRASIL, 2011) e ASME apresentado por Frayne (2002).

2.2 Consumo de energia

O consumo de energia está relacionado com a intensidade de corrente utilizada, condutividade do efluente, espaçamento e passivação dos eletrodos. De acordo com Kobya *et al.* (2006), o consumo de energia em um reator batelada pode ser calculado utilizando-se a

equação 3 adaptada.

$$C = \frac{U \cdot i \cdot t}{1000 \cdot v} \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo C o consumo de energia (em KWh), U a tensão elétrica aplicada ao processo em Volts (V), i a corrente elétrica aplicada (em A), t o tempo de aplicação da corrente ou tempo de processo (h), e o v o volume tratado em m³.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Os parâmetros físico-químicos cloretos, condutividade, alcalinidade, sólidos dissolvidos e sílica não apresentaram variação significativa em termos de concentração comparando a amostra bruta com as tratadas (Tabela 1). A condutividade é um parâmetro importante no tratamento eletrolítico pois segundo Danesvhar, Oladegaragoze e Djafarzadeh (2006) está diretamente relacionada a eficiência da corrente, tensão da célula e o consumo de energia elétrica, recomendando assim o uso de cloreto de sódio (NaCl) para elevar esse parâmetro. Nesse trabalho testou-se o tratamento sem a adição de NaCl com o intuito de manter as características naturais da água. A condutividade da água pluvial foi de 39,3 µS/cm, bem a baixo das condutividades usadas em outros trabalhos, que estão acima de 1000 µS/cm (HAKIZIMANA, 2015; HASHIM *et al.*, 2017; HASHIM, SHAW; PHIPPS, 2017) que trabalharam com água para consumo.

Observando os demais parâmetros, como a demanda química de oxigênio, turbidez, cor aparente e sólidos suspensos (Tabela 1) constatou-se que a baixa condutividade não foi empecilho pois obteve-se bons resultados, principalmente na remoção de matéria orgânica (DQO) e sólidos suspensos, que atingiram 74,44% e 100%, respectivamente.

O tratamento apresentou remoção de 9,93% de dureza, que pode ser considerada baixa quando comparado com trabalhos como de Zhao *et al.* (2014), que obtiveram 85,81%. Segundo Hakizimana *et al.* (2015), a literatura indica que a ECF é eficiente para remoção de dureza, e o que pode ser identificado como contraponto para avaliação da remoção desse parâmetro é que o tempo de tratamento foi de 30 minutos para o trabalho de Zhao, bem superior aos 2 minutos avaliados neste, e como a densidade de corrente foi inferior (5.90 mA/cm²) a que foi utilizada neste

trabalho (12,3 mA/cm²), o tempo pode ser considerado o principal fator.

Para fazer uma comparação entre os resultados obtidos com a caracterização da água pluvial bruta e tratada (6 min), foram comparados os resultados (Tabela 2) com a norma ABNT NBR 15527, a Portaria 2914, e os padrões gerais estipulados pela ASME apresentados por Frayne (2002), indicando se atende os valores preconizados.

A água pluvial tratada atendeu praticamente as três normas, com exceção do parâmetro dureza para a ASME. Recomenda-se um tempo maior de tratamento se o reuso da água for destinado à caldeiras, com intuito de corrigir esse parâmetro. Em relação a Portaria 2914, os parâmetros analisados atenderam a norma, porém, como não foram avaliados os parâmetros microbiológicos a mesma foi citada apenas a título de comparação, não sendo recomendado o uso para fins potáveis, a não ser que todos os parâmetros contidos na Portaria sejam avaliados. O tratamento atendeu a norma ABNT NBR 15527 que trata do reuso da água de chuva para fins não potáveis.

O gasto de energia elétrica foi calculado de acordo com a equação 3 onde observe-se 0,757 kWh/m³ gastos, e considerando o kWh para indústria de R\$ 0,42 (CELG, 2017) o gasto foi de R\$ 0,30. Utilizando a mesma equação para calcular o gasto da bomba centrífuga retirando a variável volume, obteve-se 1,51 kWh/m³, contabilizando R\$ 0,63. O gasto total do processo foi de R\$ 0,93, devendo destacar que a eletrocoagulação gastou a metade da energia elétrica que a bomba centrífuga usou, dispositivo este que está presente na grande maioria das estações de tratamento de água e esgoto.

CONCLUSÕES:

A verticalização de reatores de tratamento é uma alternativa econômica e ambiental que deve ser estudada e considerada, pois incentiva as empresas a fazerem sua obrigação ambiental, de forma a não ocupar grandes áreas, mantendo a relação custo benefício balanceada com a responsabilidade ambiental.

A eletrocoagulação/flotação é uma tecnologia que devido ao uso de energia elétrica não é considerado como escolha viável como opção de método de tratamento. Mas como foi observado nesse trabalho, apresenta boa eficiência, e baixo gasto energético, quando

comparado a um equipamento comum em estações de tratamento, como as bombas centrífugas.

AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária (PPGEAS-UFG) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo apoio à pesquisa.

REFERÊNCIAS:

1. ABNT. NBR 15527: Água de chuva- Aproveitamento decoberturas em áreas urbanas para fins não potáveis- Requisitos. Rio de Janeiro, 2002. p. 24.
2. APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22, Washington, 2012.
3. BRASIL. Lei Nº 13.501, de 30 de outubro de 2017.
4. BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2914/MS de 2011.
5. CELG. <https://www.celg.com.br/arquivos>, Acessada Julho de 2017.
6. Comninellis, C., Chen, G. *Springer*, **2010**, 145.
7. Daneshvar, N., Oladegaragozeb, A., Djafarzadeh, N., *J. Hazard. Mater.* **2006**, B129, 116.
8. Farias S. Análise Climática Para Goiânia– Outono De 2017. CLIMAGEO – IESA/UFG, 2017.
9. Frayne, C. Boiler Water Treatment Principles and Practice. Chemical Publishing Co. Inc.: New York, 2002.
10. Garci-Segura, S., Eiband, M.M.S.G., De Melo, J. V., Martínez-Huitle, C.A. *J. Electroanal. Chem.* **2017**, 801, 267.
11. Hakizimana, J. N., Gourich, B., Chaf, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., Naja, J. *Desalination*, **2017**, 404, 1.
12. Hashim, K. S.; Shaw, A.; Al Khaddar, R.; Pedrola, M. O.; Phipps, D. J *Environ Manage.***2017**, 189, 98.
13. Hashim, K. S.; Shaw, A.; Al Khaddar, R.; Phipps, D. J. *Environ Manage*, **2017**, 187, 80.
14. JFS. https://www.japanfs.org/en/news/archives/news_id02_7756.html. Acessada Março de 2018.
15. Kobya, M.; Hiz, H.; Senturk, E.; Aydiner, C. Demirbas, E. *Desalination*, **2006**, 190, 201.
16. Kobya, M., Ulu, U., Gebologlua, U., Demirbas, E., Oncel, M.S. *Sep. Purif. Technol.* **2011**, 77, 283.
17. Martins, P. Department for International Development, **2014**, 19.
18. Mohora, E., Roncevic, S., Dalmacija, B. Agbaba, J., Watson, M, Karlovic, E. Dalmacija, M. *J. Hazard. Mater.*, **2012**, 235, 257.
19. Mollah M.Y.; Morkovsky, P.; Gomes, J.A.; Kesmez, M.; Parga, J.; Cocke, D.L., *J. Hazard. Mater.* **2004**, 114, 199.
20. Moussa, D.T., El-Naas, M.H. Nasser, M. Al-Marri, M.J. *J Environ Manage.* ,**2017**, 1.
21. Naje, A.S., Abbas, S. A., *J. Civil Environ. Eng.* **2013**, 3,11.
22. Ulu, F.; Barışçia, S.; Kobya, M.; Sillanpää, M. *Chemosphere* (2015), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.11.063>.
23. Zhao, S.; Huang, G. C.; Guanhui, W; Yafei; Fu, H. *Desalination*,**2014**,344,454.

Tabela 1. Resultados dos parâmetros avaliados e a porcentagem de remoção média com o tratamento.

PARÂMETROS	TEMPO DE TRATAMENTO (min)				PORCENTAGEM DE REMOÇÃO (%)
	0	2	4	6	
pH	7,8	8,1	8,2	8,3	-
Demanda Química de Oxigênio (mg/L)	45	11	12	11	74,4
Turbidez (NTU)	7,8	4,4	4,3	4,2	44,9
Cor aparente (mg/L)	16,7	9,8	9,5	9,6	42,3
Sólidos Suspensos (mg/L)	45	0	0	0	100
Sólidos Dissolvidos (mg/L)	18	18	18	18	1,48
Dureza (mg/L)	47	43	42	42	9,93
Sílica (mg/L)	0,3	0,2	0,2	0,2	33,3
Alcalinidade (mg/L)	22	22	22	22	0
Condutividade Elétrica(μS/cm)	39	39	39	39	0,42
Cloretos (mg/L)	3,5	3,5	3,5	3,5	0

Tabela 2. Comparação dos parâmetros analisados entre as normas.

PARÂMETROS	Resultados		ABNT NBR 15527	Atende?		Portaria 2914	Atende?		ASME	Atende?	
	Água bruta (B)	Água tratada (T)		(B)	(T)		(B)	(T)		(B)	(T)
pH	7,8	8,3	6,0 - 8,0	sim	não	6,0 - 9,5	sim	sim	8,3 - 10,5	não	sim
Demanda Química de Oxigênio (mg/L)	45	11	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Turbidez (NTU)	7,8	4,2	< 5	não	sim	< 5	não	sim	*	*	*
Cor aparente (mg/L)	16,7	9,6	< 15	não	sim	< 15	não	sim	*	*	*
Sólidos Suspensos (mg/L)	45	0	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Sólidos Dissolvidos (mg/L)	18	18	*	*	*	< 1000	sim	sim	< 300	sim	sim
Dureza (mg/L)	47	42	*	*	*	< 500	sim	sim	< 15	não	não
Sílica (mg/L)	0,3	0,2	*	*	*	*	*	*	< 150	sim	sim
Alcalinidade (mg/L)	22	22	*	*	*	*	*	*	< 450	sim	sim
Condutividade Elétrica(μS/cm)	39	39	*	*	*	*	*	*	< 3500	sim	sim
Cloretos (mg/L)	3,5	3,5	*	*	*	< 250	sim	sim	< 300	sim	sim

*Não preconizado

(B) Água bruta

(T) Água tratada