

II-546 - ELETROCOAGULAÇÃO E ADSORÇÃO APLICADOS AO TRATAMENTO DE EFLUENTE COMBINADO CONTENDO METAIS TÓXICOS

Andrew Henrique de Sousa Carvalho ⁽¹⁾

Químico Industrial pelo Instituto Federal de Goiás (IFG). Especialista em Gestão e Qualidade Ambiental e Mestrando em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Goiás (UFG).

Andreia Cristina Fonseca Alves ⁽²⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Goiás (UFG). Mestranda em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Goiás (UFG).

Poliana Nascimento Arruda ⁽³⁾

Sanitarista pelo Instituto Federal de Goiás (IFG), Mestre em Engenharia do Meio Ambiente e Doutoranda em Ciências Ambientais pela Universidade Federal de Goiás (UFG).

Renata Medici Frayne Cuba ⁽⁴⁾

Química pela Universidade de São Paulo (USP), Mestre e Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo. Professora da Escola de Engenharia Civil e Ambiental na Universidade Federal de Goiás (UFG).

Paulo Sérgio Scalize ⁽⁵⁾

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia Civil de Araraquara, Mestre e Doutor pela Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP. Professor da Escola de Engenharia Civil e Ambiental na Universidade Federal de Goiás (UFG).

Endereço⁽¹⁾: Av. Universitária, 1488, Q. 86, L. Área - Setor Universitário-Goiânia - GO - CEP: 74605-220 - Brasil - Tel: (62) 98168-7783 - e-mail: carvalhoandrew@gmail.com

RESUMO

A tecnologia de tratamento aplicada a efluentes combinados deve possuir alta eficiência devido à complexidade e a diversidade de poluentes contidos no mesmo. A eletrocoagulação e a adsorção por carvão ativado são tecnologias que possuem versatilidade e bons resultados, mostrando ser opções para o tratamento de efluentes complexos. Desse modo, a pesquisa teve como objetivo verificar a eficiência do tratamento por eletrocoagulação e adsorção em carvão ativado no tratamento de efluentes industriais combinados, analisando se o efluente tratado atende os limites estabelecidos pela legislação pertinente. O efluente utilizado nos ensaios é advindo de indústrias de processamentos de grãos, sanitário e de fabricação de refrigerantes, e ainda foram adicionados a mistura metais tóxicos. O efluente bruto foi caracterizado de acordo com os seguintes parâmetros: pH, cor aparente, turbidez, condutividade elétrica, DQO e os metais Cromo (Cr), Cobre (Cu), Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Ferro (Fe), Mercúrio (Hg), Potássio (K), Manganês (Mg), Sódio (Na), Bário (Ba). Os ensaios de eletrocoagulação foram realizados em um reator e o efluente tratado foi caracterizado em três tempos distintos, de 20, 40 e 60 minutos. Para os ensaios de adsorção foram utilizados 0,1 g, 0,5 g e 1,0 g de carvão para o efluente tratado no tempo de 60 segundos e após foram analisados os metais Cr, Al e Hg. Foi observado que o pH sofreu um aumento crescente, porém dentro do limite estabelecido pela na resolução Conama 430/2011 e os parâmetros turbidez, cor aparente e DQO, obtiveram uma elevada remoção nos primeiros 20 minutos. Os metais Cr e Hg foram os únicos que não foram removidos satisfatoriamente, entretanto após os ensaios de adsorção observou-se a conformidade quanto a resolução. Percebe-se que a eletrocoagulação, utilizando eletrodos de chapas de alumínio, apresentou resultados satisfatórios, bem como o uso da adsorção por carvão ativado como polimento. Portanto, o conjunto eletrocoagulação e adsorção mostrou ser uma tecnologia funcional para o tratamento de efluentes combinados.

PALAVRAS-CHAVE: Eletrocoagulação, Adsorção em carvão ativado, Efluente combinado, Metais tóxicos.

INTRODUÇÃO

Os distritos industriais (DI) estão se tornando uma realidade cada vez mais presentes no território nacional devido à necessidade das empresas ou incentivos fiscais do governo de modo a proporcionar o desenvolvimento para determinadas regiões. Os DI podem ser definidos como aglomerados de empresas de determinado setor de atividade que mantem relações de cooperação e desenvolvimento em uma determinada

localidade geográfica (SANTOLIN e TEN CATEN, 2015), podendo compartilhar de normas regulamentadoras, desde aspectos econômicos até ambientais, como é o caso do Distrito Agroindustrial de Anápolis (DAIA) e o Distrito Industrial de Senador Canedo (DISC), ambos localizados no estado de Goiás.

O tratamento dos efluentes industriais gerados por pelas indústrias que fazem parte dos DI, pode ocorrer de maneira individual, ou seja, sendo tratado em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) na indústria geradora, ou tratado de forma conjunta em uma única ETE dentro do Distrito. Desse modo, no segundo caso, o efluente torna-se mais complexo devido à variedade de poluentes combinados, o que requer maior atenção quanto às tecnologias aplicadas no seu tratamento, buscando o enquadramento nos limites estabelecidos para lançamento em corpo hídrico de acordo com Resolução Conama nº430/2011 (BRASIL, 2011).

Dentre os métodos de tratamento de efluentes pode-se destacar a eletrocoagulação (EC), que se enquadra como um tratamento não convencional, porém resulta em bons resultados de tratabilidade para uma ampla variedade de poluentes, principalmente aqueles considerados de baixa biodegradabilidade.

Basicamente a EC é a associação de três mecanismos: o eletroquímico, a coagulação e a flotação. A tecnologia faz uso de corrente elétrica aplicada através de placas metálicas (eletrodos), com intuito de promover a geração de íons metálicos que na presença da água dão origem aos hidróxidos metálicos, que são eficazes na remoção de poluentes, por complexação ou atração eletrostática, seguida por coagulação, sedimentação ou flotação (ULU, 2014) sendo essa última realizada com ar dissolvido ou induzido devido à formação e liberação dos gases hidrogênio e oxigênio nos eletrodos. Outro mecanismo do processo é a reação catódica simultânea que permite a remoção de poluentes por deposição no eletrodo de cátodo ou por eletroflotação, relacionada a evolução do hidrogênio no cátodo. Os reatores podem ser operados em regime contínuo ou batelada (HAKIZIMANA et al., 2017).

O alumínio e o ferro são os metais mais comumente utilizados como eletrodo devido—a sua grande disponibilidade como matéria prima e baixo custo, elevada eficiência de remoção dos poluentes devido às altas valências dos íons em solução, além da baixa toxicidade relacionada aos hidróxidos metálicos formados pela eletrodissolução do ânodo, (HAKIZIMANA et al., 2017).

No entanto, devido à alta complexidade desses efluentes a associação de métodos de tratamento é uma estratégia usada com intuito de melhorar a qualidade e atingir os parâmetros legais para descarte. A adsorção por carvão ativado pode ser usada como um desses métodos, sendo um processo de remoção de poluentes que tem sido amplamente utilizado no tratamento de água, ar e efluentes. O carvão ativado caracteriza-se por ter uma área superficial específica elevada, além de uma estrutura porosa desenvolvida resultando em um material com capacidade de adsorver uma gama de moléculas e metais pesados (GORGULHO et.al., 2008).

Portanto, esse trabalho teve por objetivo verificar a eficiência do tratamento por eletrocoagulação seguido por adsorção em carvão ativado, analisando se o efluente tratado atende os limites estabelecidos pela legislação pertinente.

MATERIAIS E MÉTODOS

ELETROCOAGULAÇÃO

O reator de eletrocoagulação foi construído utilizando um recipiente de polietileno com volume de 5 litros. Os eletrodos foram confeccionados com chapas de alumínio, dispostas de forma circular e associadas em paralelo pela tampa do recipiente, totalizando em quatro pares de eletrodo. Os ânodos foram posicionados nas chapas externas com dimensões de 10 x 8cm com massa total de 18g, e os cátodos nas chapas internas com dimensões de 15 x 4 cm com 13 g de massa total. Para o fornecimento de energia utilizou-se uma fonte da marca Meind de 12V com 10A. Na Figura 1 é apresentado o esquema do reator de batelada utilizado na pesquisa.

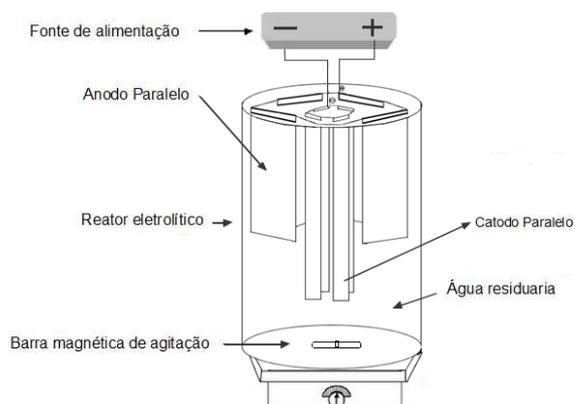


Figura 1: Esquema do reator de eletrocoagulação de batelada.

A forma cilíndrica do reator associada à localização e formato dos eletrodos e cátodos, respectivamente, somado ao fluxo rotacional gerado pelo agitador e suspensão das microbolhas permitiam uma homogeneização do efluente. Os ensaios foram realizados sob agitação constante de 200 rpm, com densidade de corrente aplicada de 8,93 mA/cm².

O efluente utilizado no experimento foi produzido de forma a se obter um efluente com alta carga orgânica e diferentes concentrações de metais pesados. A carga orgânica foi obtida a partir de uma mistura na proporção 1:1:1 de efluentes provindos de indústrias de processamentos de grãos, sanitário e de fabricação de refrigerantes, enquanto que para simular a presença de metais tóxicos foram adicionados à mistura, sulfato de mercúrio (Hg₂SO₄), cloreto de cobre (CuCl₂) e dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇), o volume final de efluente a ser tratado foi de 5L.

A caracterização foi realizada em quatro etapas, sendo a primeira do efluente bruto e as demais durante o período de tratamento com amostragem após 20, 40 e 60 minutos de tratamento.

Os parâmetros físico-químicos utilizados para caracterização estão listados na Tabela 1. Os metais analisados foram: Cromo (Cr), Cobre (Cu), Alumínio (Al), Cálcio (Ca), Ferro (Fe), Mercúrio (Hg), Potássio (K), Manganês (Mg), Sódio (Na), Bário (Ba), que foram os metais encontrados nessa combinação de efluentes, de acordo a série de metais analisados pelo ICP-EOS.

Tabela 1: Parâmetros, equipamentos e metodologias empregados na pesquisa

PARÂMETRO	EQUIPAMENTO	METODOLOGIA
pH	PHmetro Qualxtron Model 8010	SMWW4500H+B ⁽¹⁾
Cor aparente	Lambda 25 UV/VIS Spectrometer Perkin Elmer	SMWW 2120C ⁽¹⁾
Turbidez	2100P Turbidimeter Hach	SMWW 2130B ⁽¹⁾
Condutividade elétrica	Thermo Electron Corporation Orion 115A+	SMWW 2510B ⁽¹⁾
Sólidos Dissolvidos	Banho Maria Ethik/ Estufa de Secagem Nova Ética/ Membrana Machery-Nagel	SMWW 2540 C ⁽¹⁾
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	Digestora DRB 200 Hach / Lambda 25 UV/VIS Spectrometer Perkin Elmer	SMWW 5220D ⁽¹⁾
Metais	Optima 7300 DV Perkin Elmer- Espectrômetro de massas com plasma indutivamente acoplado (ICP-EOS)	EPA USEPA 3010A ⁽²⁾
Cromo Hexavalente	Lambda 25 UV/VIS Spectrometer Perkin Elmer	SMWW 3500-Cr B ⁽¹⁾

⁽¹⁾ APHA; AWWA; WEF (2012); ⁽²⁾ EPA (1992).

ADSORÇÃO

Para realização dos ensaios de adsorção utilizou-se o carvão ativado da marca Boyu AC-150 como adsorvente. Os ensaios foram feitos em duplicatas em temperatura de 25°C, utilizando 100 mL do efluente tratado no processo de eletrocoagulação do tratamento de 60 minutos. Foram testadas três massas de carvão ativado, sendo 0,1g, 0,5 g e 1,0 g de carvão por um período de 24 h e mantendo-se as amostras sob agitação. Calculou-se a quantidade adsorvida de metais por grama de adsorvente, q_{eq} (mg/g), por meio da equação (1).

$$q_{eq} = \frac{(C_0 - C_{eq}) \cdot V}{m_a} \quad \text{equação (1)}$$

Sendo: q_{eq} = quantidade adsorvida por massa de adsorvente (mg/g); C_0 = concentração inicial da solução (mg/L); C_{eq} a concentração de equilíbrio da solução (mg/L); V = volume de solução no erlenmeyer (L); m_a = massa de adsorvente (g).

Para verificação da eficiência da adsorção foi testado o comportamento dos metais que não obtiveram remoção necessária para o atendimento da legislação. Desse modo, os parâmetros analisados foram: Cromo (Cr), Alumínio (Al), Mercúrio (Hg).

CÁLCULO DE CUSTOS

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 (2) adaptada.

$$C = f \cdot \frac{U \cdot i \cdot t}{1000} \quad \text{equação (2)}$$

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), onde f equivale ao fator de potência de 0,65 para ajustar a unidade VA em W.

RESULTADOS

Os resultados dos parâmetros utilizados para avaliar a eficiência do processo de eletrocoagulação estão apresentados na Tabela 2, juntamente com seus respectivos resultados do efluente bruto e por tempo de tratamento.

Tabela 2: Parâmetros medidos com base no tempo de eletrocoagulação

PARÂMETROS	TEMPO DE ELETROCOAGULAÇÃO				% REMOÇÃO		
	Bruto	20 min	40 min	60 min	20	40	60
pH	6,4	6,8	7,2	7,8	*	*	*
Turbidez (NTU)	102	4,8	3,2	3	95,3	96,9	97,1
Condutividade elétrica ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^2$)	522	507	499	481	2,9	4,4	7,9
Sólidos Dissolvidos (mg/L)	25	25	24	23	0,0	4,0	8,0
Cor aparente ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	153,3	2,1	< 1,0	< 1,0	98,6	100,0	100,0
DQO ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	458,7	163,6	144,5	137,2	64,3	68,5	70,1

De acordo com a Tabela 2, observa-se que o pH se tornou levemente alcalino. A taxa de aumento foi de 0,4, 0,4 e 0,6 a cada 20 minutos de eletrocoagulação. Esse aumento ocorre devido a evolução do hidrogênio no cátodo (CRESPILHO; SANTANA; REZENDE, 2004). Os valores de pH se enquadram na resolução Conama 430/2011 (BRASIL, 2011) que estabelece uma faixa entre 5,0 e 9,0.

A Figura 2 apresenta uma imagem do processo de eletrocoagulação ocorrendo, apresentando a separação de fases do lodo flotado pelas microbolhas que estão sendo formadas na superfície do eletrodo.



Figura 2: Imagem do processo de eletrocoagulação ocorrendo com a separação de fases e formação das microbolhas.

Em relação à turbidez, cor aparente e DQO, obteve-se uma elevada remoção nos primeiros 20 minutos de eletrocoagulação, de cerca de 95,3%, 98,6% e 64,3%, respectivamente. A Figura 3 apresenta o comportamento do tratamento em termos de porcentagem remanescente, sendo que após o tempo de 20 minutos não foi observada diferença significativa na remoção quando comparada a remoção inicial, indicando que a DQO residual está relacionada a matéria orgânica dissolvida, pois a cor aparente e a turbidez estão relacionadas aos sólidos suspensos, e como observado nos valores dos sólidos dissolvidos contidos na Tabela 2, a remoção até 20 minutos foi de 0%. Destaca-se que, provavelmente a remoção nos primeiros 20 minutos não é linear, sendo necessário testar tempos inferiores para verificação da eficiência de remoção para cada tempo de tratamento a fim de estabelecer parâmetros de projeto.

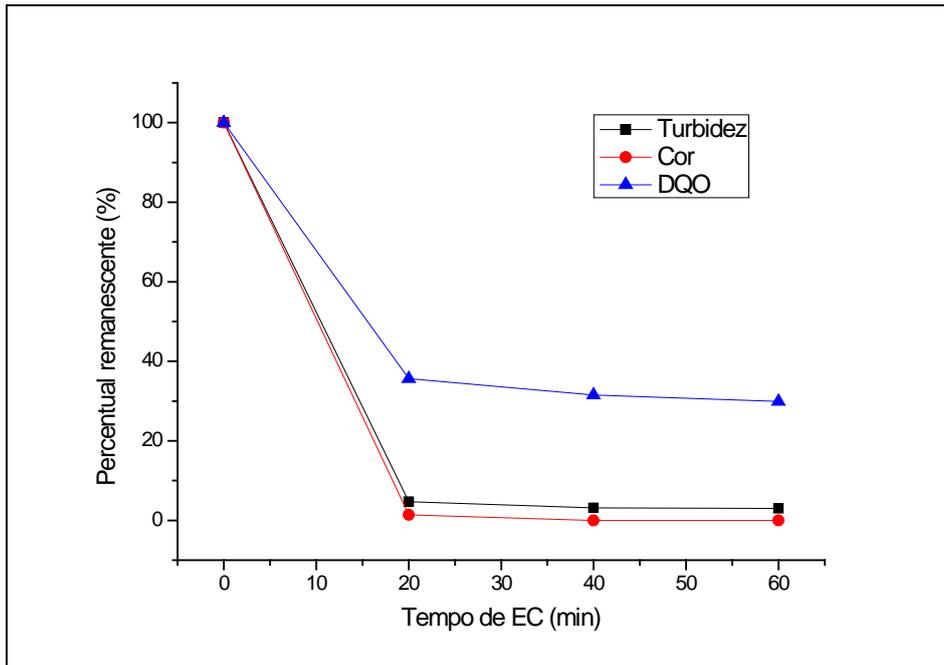


Figura 3: Percentual remanescente de cor, turbidez e DQO em relação ao tempo de eletrocoagulação

A condutividade elétrica e os sólidos dissolvidos apresentaram comportamento semelhante, e por meio da análise estatística de regressão linear entre esses valores apresentada na Figura 4, foi obtido um R^2 de 0,8701, indicando que 87 % da variação dos dados podem ser explicados por essa relação. Com isso, conclui-se que a condutividade elétrica do efluente é causada, em grande parte, pelos sólidos dissolvidos no efluente, e como a eletrocoagulação não possui grande eficiência na remoção desse tipo de sólidos, a condutividade seguiu o mesmo padrão.

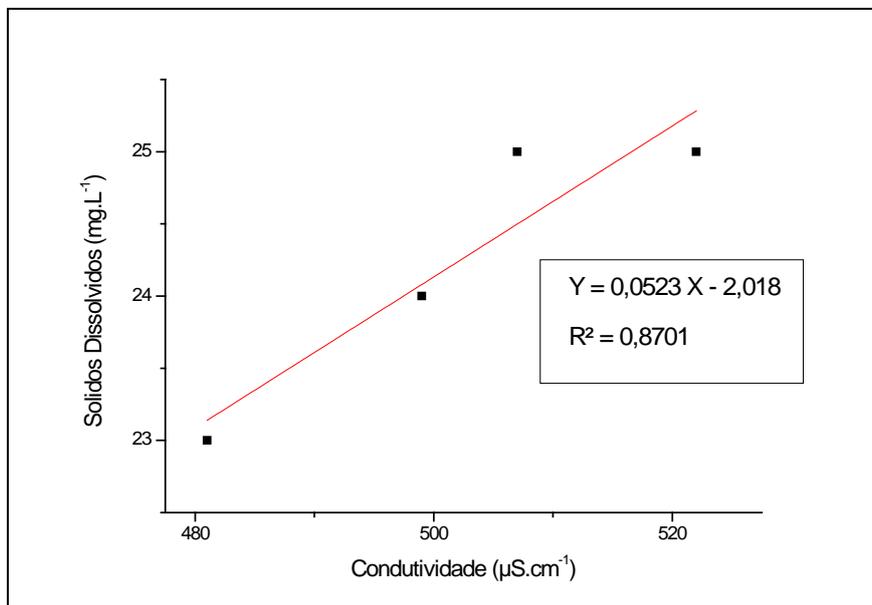


Figura 4: Regressão linear correlacionando condutividade e sólidos dissolvidos.

Os resultados da Tabela 3 apresentam a remoção de metais por eletrocoagulação.

Tabela 3: Metais quantificados no efluente por tempo de eletrocoagulação.

METAL	CONCENTRAÇÃO (MG/L) POR TEMPO DE ELETROCOAGULAÇÃO				REMOÇÃO EM 60 MIN (%)
	Bruto	20 min	40 min	60 min	
Cromo (Cr)	3,89	2,86	2,20	1,58	59,38
Cobre (Cu)	7,72	0,07	0,07	0,07	99,09
Cálcio (Ca)	46,99	42,68	42,35	40,89	12,98
Ferro (Fe)	1,92	0,43	0,39	0,38	80,19
Mercúrio (Hg)	7,14	3,58	3,08	2,36	66,95
Potássio (K)	10,27	9,81	9,67	8,81	14,22
Sódio (Na)	8,28	8,02	7,67	7,09	14,34

Pode observar na Tabela 3 que o cobre obteve remoção quase que total aos 20 minutos com concentração de 0,07 mg/L, atendendo a Resolução Conama nº430 (BRASIL, 2011), em que a quantidade máxima é 1,0 mg.L⁻¹. Com relação aos metais remanescente que não atenderam a legislação, tem-se o mercúrio e o cromo que apresentaram 2,36 mg.L⁻¹ e 1,58 mg.L⁻¹, respectivamente após 60 minutos de ensaio de eletrocoagulação. A remoção desses metais foi elevada, no entanto, não atendeu a Resolução Conama nº430 que fixa valores de 0,01 mg.L⁻¹ Hg e 1,0 mg.L⁻¹ Cr⁺³. Com relação à concentração de alumínio, esta, resultou em um aumento de 2,38 mg.L⁻¹ a 10,12 mg.L⁻¹, pelo fato de o eletrodo ser feito desse metal e a retirada das alíquotas ter sido realizada antes da flotação total do lodo, composto grande parte por alumínio, formado no processo. O potássio, sódio e cálcio obtiveram baixa remoção e torno de 13 a 14%, e na Resolução Conama nº430 não consta especificação de concentração, o ferro mesmo no efluente bruto, se encontrava em concentrações inferiores a Resolução, portanto, estes 4 metais foram apresentados a título de caracterização.

Tabela 4: Concentração remanescente dos metais após o teste de adsorção, com diferentes massas do adsorvente, com o efluente obtido após 60 minutos de ensaio de eletrocoagulação a 25 °C por 24 horas.

METAL	CONCENTRAÇÃO INICIAL (MG.L ⁻¹)	MASSA DO ADSORVENTE (g)		
		0,1	0,5	1
		CONCENTRAÇÕES FINAIS (mg.L ⁻¹)		
Cromo (Cr)	1,58	1,26	1,18	1
Alumínio (Al)	10,12	1,247	0,974	0,131
Mercúrio (Hg)	2,36	0,067	0,059	0,013

Como forma de polimento utilizou-se carvão ativado para adsorção dos metais remanescentes. Após a adsorção foi avaliada a remoção do Cr, Al e Hg. O teste de adsorção apresentou que a quantidade que melhor adsorveu foi de 1,0 g de adsorvente. A quantidade adsorvida foi calculada segundo a equação (1), onde o alumínio apresentou 9,9916 mg/g, cromo 0,55029 mg/g e mercúrio 2,3469 mg/g, apresentando concentrações finais de 1,0 mg.L⁻¹ de Cr, 0,1 mg.L⁻¹ de Al e 1,0 mg.L⁻¹ de Hg. O carvão ativado demonstrou ser uma boa alternativa como tecnologia associada à eletrocoagulação, pois as concentrações finais tanto do mercúrio como do cromo se enquadram na resolução Conama nº430 (BRASIL, 2011). Para constatar se a quantidade total correspondia apenas ao cromo trivalente, utilizou-se o método SMWW 3500-Cr B (APHA, 2012) para detectar a quantidade cromo hexavalente no efluente com 60 minutos antes da adsorção, e o resultado obtido foi menor que o limite de quantificação. Quanto ao alumínio, não há nenhuma especificação na Resolução Conama nº430 (BRASIL, 2011), mas o resultado se enquadra na resolução Conama nº357 (BRASIL, 2005) para águas de classe 1, que estipula o valor máximo 0,1 mg.L⁻¹ Al.

O consumo de energia elétrica foi calculado com a equação (2), onde a corrente aplicada foi de 0,7 A, a tensão de 12 V e o tempo de 1h. O consumo nesse período foi de cerca de 0,0056 KWh, e considerando o valor de R\$ 0,73 do KWh cobrado pela companhia de energia de Goiás (CELG), o custo total foi de cerca de R\$ 0,004, considerando que o teste foi feito em reator de bancada o cálculo, portanto, não teve relação com o volume do efluente. Para estações em escala real, o tempo de detenção hidráulico (TDH) para tratamentos contínuos deve entrar para os cálculos afim de estabelecer parâmetros de projeto, além de dados como desgaste dos eletrodos.

CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos no tratamento do efluente em questão, percebe-se que a eletrocoagulação, utilizando eletrodos de chapas de alumínio, apresentou um resultado satisfatório ao tratamento de águas residuais, devido a alta eficiência e a redução de contaminantes, sendo que com cerca de 20 minutos de tratamento a porcentagem de remoção da maioria dos parâmetros foi elevada, principalmente para o cobre, cor aparente e turbidez. .

Outro ponto observado neste estudo foi a eficiência na remoção dos metais com a aplicação do polimento por adsorção em carvão ativado. Portanto, o conjunto eletrocoagulação e adsorção mostrou ser uma tecnologia funcional para o tratamento de efluentes combinados.

Como sugestão, outros trabalhos podem ser desenvolvidos envolvendo a cinética química dos metais traços na eletrocoagulação, influência do pH na remoção, estudo de outros metais a serem utilizados como eletrodo, e a influência da corrente e tensão elétrica na eficiência do tratamento. Esses estudos podem aumentar o conhecimento e aplicabilidade dessa tecnologia, que há muito tempo vem sendo usada na indústria nos processos de eletrólise e que tem um grande potencial para o tratamento das águas residuais, de modo a permitir a utilização desse efluente até mesmo como água de reuso.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária (PPGEAS) da Universidade Federal de Goiás (UFG) pelo apoio prestado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. AWWA., WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22st Edition. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA, 2012.
2. BRASIL. Resolução CONAMA 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional de Meio Ambiente, 2005.
3. BRASIL. Resolução CONAMA 430, de 13 de maio de 2011. Conselho Nacional de Meio Ambiente, 2005.
4. CRESPILO, F.N., SANTANA, C.G., REZENDE, M.O.O. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. *Química Nova*, v. 27, n. 3, p. 387-392, 2004.
5. GORGULHO, H. F., MESQUITA, J. P., GONÇALVES, F., PEREIRA, M. F.R., FIGUEIREDO, J. L. Characterization of the surface chemistry of carbon materials by potentiometric titrations and temperature-programmed desorption. *Carbon*, Oxford, v. 46, n. 12, p. 1544-1555, 2008.
6. HAKIZIMANA, J. N. et al. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, v. 404, p. 1–21, 2017.
7. KOBAYA, M. et al. Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation. *Desalination*, v. 190, n. 1–3, p. 201–211, 2006
8. SANTOLIN, R.B.; TEN CATEN, C.S. Modelos de distritos industriais sob a ótica da sustentabilidade: uma revisão bibliográfica. *Iberoamerican Journal of Industrial Engineering*, v. 7, n. 14, p. 129-150, 2015.
9. ULU, F. et al. Removal of humic substances by electrocoagulation (EC) process and characterization of floc size growth mechanism under optimum conditions. *Separation and Purification Technology*, v 133, p. 246–253, 2014.