

Aplicação da técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouro de aves

Application of the electrocoagulation technique on the treatment of wastewaters coming from a poultry slaughterhouse

**Aparecido Nivaldo Módenes¹, Fernando Rodolfo Espinoza-Quiñones¹,
Patricia Hissae Yassue², Thaís Mendes Porto², Paulo Sérgio Theodoro³**

RESUMO

Neste trabalho a técnica de eletrocoagulação (EC) foi aplicada no tratamento de efluentes de abatedouro de aves. Um planejamento experimental fatorial completo 3³, foi realizado com o intuito de obter os valores ótimos de três variáveis do processo EC (corrente elétrica, pH e tempo de eletrólise). O desempenho foi avaliado pela eficiência da remoção da cor, a turbidez e a demanda química de oxigênio (DQO). As condições ótimas do processo foram obtidas para o pH inicial 8, tempo de eletrólise de 50 min e intensidade de corrente de 2 A. Entre os parâmetros de qualidade avaliados, os valores da cor e turbidez na condição ótima de operação estão de acordo com a legislação brasileira de lançamentos de efluentes líquidos em corpos de água receptores, classe III. Embora houvesse uma boa redução na quantidade inicial de DQO (de 9252 para 830 mgL⁻¹), esta não possui um limite recomendado pela legislação ambiental em vigor. Contudo, um polimento adicional dentro de um sistema integrado de processos levaria a valores ainda menores. Do ponto de vista do custo operacional e a substancial redução dos poluentes (90-99%), a eletrocoagulação pode ser considerada como uma técnica alternativa e promissora a ser aplicada no tratamento de efluentes de abatedouros de aves.

Palavras-chave: planejamento experimental; remoção de cor; turbidez.

ABSTRACT

In this work an electrocoagulation (EC) process was applied on the treatment of poultry slaughterhouse wastewaters. A 3³ full factorial experimental design was carried out for obtaining optimal values of three EC reactor parameters (electric current, initial pH and electrolysis time). The performance was evaluated by the removal efficiency of color, turbidity and COD. The optimum process conditions were obtained for the initial pH 8, electrolysis time of 50 min and electric current of 2 A. Among the evaluated quality parameters, the values of color and turbidity at the optimum operation condition are in accordance with the Brazilian legislation for liquid effluent discharges into receiving 3rd class water bodies. Although there was a good reduction on the initial amount of COD (from 9252 to 830 mgL⁻¹), such parameter has no a recommended limit value in this regard. However, an additional polishing in an integrated process would lead to even lower values. From the point of view of operating costs and substantial reduction of pollutants (90-99%), the electrocoagulation technique can be considered a promising alternative one to be applied on the wastewaters treatment from poultry slaughterhouses.

Keywords: experimental design; color removal; turbidity.

INTRODUÇÃO

O Brasil é o país que lidera mundialmente o *ranking* das exportações de frango. Em maio de 2011, exportou 338,52 mil toneladas, uma alta de 5,1% em relação ao mesmo mês do ano anterior (UBABEF, 2011). Este aumento é justificado pelas taxas de câmbio favoráveis da moeda e pela conquista de novos mercados consumidores. A problemática central do aumento da produção e exportação de frangos no país consiste no fato de a indústria frigorífica fazer uso de grandes quantidades de água em seu processo, o que gera excessiva quantidade de efluentes industriais, caracterizada por conter elevada carga orgânica,

em especial de proteínas e compostos de cadeias longas (VALLADÃO; FREIRE; CAMMAROTA, 2007).

Alguns compostos não biodegradáveis, também chamados de xenobióticos — tais como pesticidas, herbicidas, solventes halogenados, hidrocarbonetos aromáticos clorados, hidrocarbonetos alifáticos clorados e toxinas —, são liberados em excesso nos corpos receptores, sendo considerados muito tóxicos ou recalcitrantes devido à sua estrutura molecular, elevado tamanho das moléculas e ligações químicas C-Cl muito estáveis (MORENO-CASILLAS *et al.*, 2007). A aplicação de processos biológicos ou convencionais, nestes casos torna-se

¹ Professor do Programa de Pós-graduação do Curso de Engenharia Química na Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Toledo (PR), Brasil.

² Acadêmica do curso de Engenharia Química da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Toledo (PR), Brasil.

³ Acadêmico do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – Toledo (PR), Brasil.

Endereço para correspondência: Aparecido Nivaldo Módenes - Rua da Faculdade, 645 - Jardim Santa Maria - 85903-000 - Toledo (PR), Brasil - E-mail: modenes@unioeste.br
Recebido: 30/11/11 - **Aceito:** 15/09/16 - **Reg. ABES:** 75999

ineficiente em diversos sistemas de tratamento industriais. Nesse sentido, é constante a busca por novas tecnologias que possam remover ou degradar os efluentes industriais contendo tanto compostos biodegradáveis como não biodegradáveis, com alta eficiência e baixo custo.

Dada a natureza do processo de electrocoagulação (EC) que inclui a flotação, coagulação e oxidação de poluentes orgânicos não particulados, a EC é um processo efetivo na remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos (ILHAN *et al.*, 2008). Além disso, considerando as características do processo EC, por exemplo, a simples operação, o menor tempo de reação e a produção de pequena quantidade de lodo residual, essa técnica pode ser vantajosa no tratamento de efluentes industriais com elevadas cargas orgânicas e inorgânicas se comparado aos processos convencionais (ESPINOZA-QUIÑONES *et al.*, 2009a). A EC tem hoje uma ampla gama de aplicações, entre as quais se destacam: efluentes têxteis (BAYRAMOGLU; EYVAZ; KOBYA, 2007; RAGHU & Basha, 2007; RAJU *et al.*, 2008; PALÁCIO *et al.*, 2009); águas residuais de lavanderias (GE *et al.*, 2004); remoção de íon fluoreto (SHEN; GAO; CHEN, 2005); tratamentos de efluentes de curtumes (ESPINOZA-QUIÑONES *et al.*, 2009a; 2009b; MURUGANANTHAN; RAJU; PRABHAKAR, 2004), galvanoplastia (ESPINOZA-QUIÑONES *et al.*, 2012) e efluentes de frigoríficos (BORBA *et al.*, 2010; PAULI *et al.*, 2012). No entanto, a aplicação desse processo em efluentes com alta carga orgânica tem sido pouco estudada.

Dessa forma, este trabalho tem por objetivo aplicar a técnica de EC no tratamento de efluentes oriundos de abatedouros de aves. Um planejamento experimental completo 3^3 com uma análise de resposta 3D foi aplicado aos dados do processo para determinação das condições ótimas do processo EC. Foram avaliados os efeitos do tempo de eletrólise, do pH inicial e da intensidade de corrente. Uma análise do custo operacional foi realizada a fim de mostrar a viabilidade econômica de sistemas de tratamento baseados na técnica de electrocoagulação.

METODOLOGIA

Coleta e caracterização dos parâmetros físicos e químicos

O efluente utilizado neste trabalho foi coletado de um tanque de equalização da estação de tratamento de uma indústria frigorífica localizada em Palotina-PR. Após a coleta, o efluente foi armazenado em laboratório conforme a metodologia descrita na norma NBR 9898/87 (ABNT, 1987).

Na caracterização do efluente bruto e do tratado após os experimentos de EC, o valor de cada parâmetro físico-químico foi determinado seguindo as metodologias padrões descritas no APHA (2005). O pH foi medido utilizando um pHmetro digital (Tecnal TEC-2) e a demanda química de oxigênio determinada pelo método refluxo fechado/método colorimétrico. A cor verdadeira foi medida utilizando um colorímetro Portable Dalatogging Spectrophotometer HACH DR/2010 com comprimento

de onda de 430 nm. A turbidez (Nephelometric Turbidity Unit, NTU) foi determinada por meio de um turbidímetro Tecnal, modelo TB1000.

Reator de EC

Para realização dos experimentos de EC, em batelada, foi utilizado um reator em escala laboratorial constituído de material plástico com capacidade de 2 litros, conforme esquema apresentado no Gráfico 1, provido de uma válvula para fácil escoamento do lodo gerado após o tratamento de EC. Os eletrodos, tipo colmeia, foram confeccionados com placas de ferro, com largura de 5 cm, altura de 15 cm e espessura de 3 mm. A distância fixa entre as 6 placas de ferro foi de 1 cm com uma área efetiva de 672 cm². Para a alimentação da corrente elétrica foi utilizada uma fonte de corrente contínua de modelo *Instrutemp DC Power Supply* – FA 1030, com carga máxima de 10 A e tensão máxima de 30 V. Como altos valores de condutividade elétrica foram medidos em todas as amostras, não foi necessária a adição de reagentes químicos para incrementar a passagem da corrente elétrica. Para a faixa de valores de corrente elétrica testada (1 a 3 A) as tensões elétricas aplicadas aos eletrodos de ferro estiveram na faixa de 10 a 14 V.

A inversão da polaridade foi efetuada a cada 20 minutos para que não ocorresse a passivação dos eletrodos. O volume efetivo tratado de cada amostra foi de 1,3 litros. O efluente foi constantemente agitado utilizando um agitador magnético. No final de cada ensaio, o material flutuante e o precipitado foram retirados e uma amostra do efluente clarificado recolhida e deixada em repouso durante 3 horas em um balão de polietileno para posterior caracterização.

Planejamento experimental

A matriz experimental foi desenvolvida aplicando o planejamento prático completo 3^3 . O experimento consistiu na análise dos efeitos dos fatores intensidade de corrente (i), pH do efluente bruto, e tempo

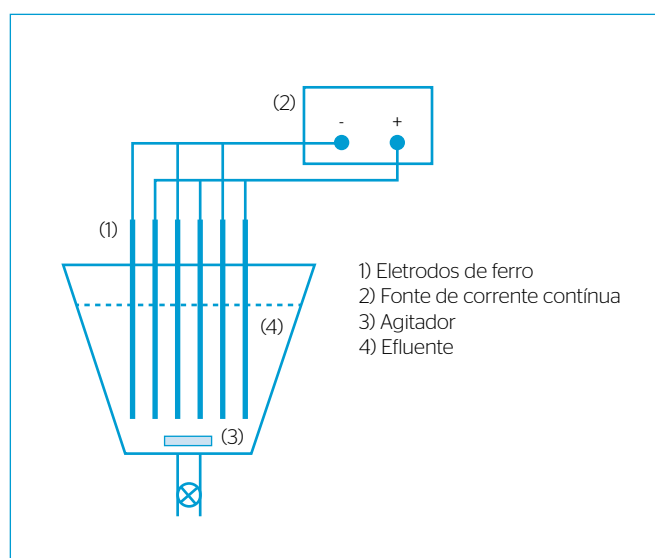


Gráfico 1 – Esquema do reator de electrocoagulação.

(min) sobre os parâmetros respostas avaliados em três níveis, apresentados pela Tabela 1, juntamente com os seus respectivos coeficientes.

Para a representação dos dados experimentais de cada variável de resposta (cor verdadeira, DQO e turbidez), foi proposto um modelo matemático de regressão (função resposta) apresentado pela equação 1.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j>i}^k \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

Em que:

y é a função resposta de cada parâmetro analisado,

x os parâmetros do reator (pH, tempo de eletrólise e intensidade de corrente) e

os valores de β são os coeficientes significativos no modelo.

Os modelos de regressão, obtidos por meio das análises estatísticas, fazem a correlação entre a função resposta (percentual de remoção da cor, turbidez e DQO) e os fatores significativos (pH, tempo e intensidade de corrente elétrica) juntamente com as interações entre os mesmos. A validade dos modelos matemáticos gerados foi comprovada pela análise de variância (ANOVA).

Análises de custo operacional

O custo operacional de qualquer tratamento de efluentes é um critério muito importante para a avaliação da aplicabilidade do método em escala industrial. Para se efetuar a análise de custos operacionais, dois parâmetros são de grande relevância: a quantidade de energia consumida e a quantidade de material utilizado na fabricação do eletrodo (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

O custo operacional elétrico (COE) é calculado com base na quantidade de energia elétrica consumida (kWh/m³ do efluente tratado) e no preço da energia elétrica (PEE em R\$/kWh), dada pela equação 2.

$$COE = \frac{V \cdot i \cdot t}{V_{eff}} \cdot PEE \quad (2)$$

Em que:

COE é dado em R\$/m³,

V é a tensão aplicada (V),

i é a intensidade de corrente (A),

t é o tempo de funcionamento (h),

V_{eff} é o volume efetivo total de efluente tratado (L) e

PEE é o custo da eletricidade industrial (R\$/kWh).

O custo dos materiais (CM) dado em R\$/m³ leva em conta a massa máxima possível de ferro teoricamente dissolvida pelo ânodo por m³ de efluente, obtido pela equação 3.

$$CM = \frac{i \cdot t \cdot M \cdot PME}{n \cdot F \cdot V_{eff}} \quad (3)$$

Em que:

PME é o preço de material de eletrodo (R\$.g⁻¹),

M é a massa molar relativa do ferro (g.mol⁻¹),

n é o número de elétrons envolvidos na reação de oxidação/redução,

F é a constante de Faraday (96.500 C.mol⁻¹),

i a intensidade de corrente elétrica (A), e

t o tempo de eletrólise (s).

Assim, o custo total (CTO) é dado pelo somatório do custo operacional do processo de eletrocoagulação e do custo dos materiais, conforme equação 4.

$$CTO = COE + CM \quad (4)$$

RESULTADOS

Caracterização do efluente bruto

Antes de qualquer tratamento utilizando o processo de eletrocoagulação, efetuou-se a caracterização físico-química do efluente bruto, e obteve-se valores de 6,6 para o pH, 16.000 mg L⁻¹ Pt-Co para a cor verdadeira, 778 NTU para a turbidez, e 9.252 mg.L⁻¹ para a DQO.

Eficiência de remoção de cor, turbidez e DQO

A aplicação do planejamento experimental completo 3³ gerou uma quantidade de 27 ensaios experimentais realizados aleatoriamente, com as seguintes condições apresentadas na Tabela 2, juntamente com as percentagens de remoção dos parâmetros respostas (cor verdadeira, turbidez, DQO).

DISCUSSÃO

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 2, verifica-se que as maiores taxas de porcentagem de remoção obtidas foram: 100% para a cor, 99,96% para a turbidez e 94,43% para a DQO. Entretanto, a melhor eficiência de remoção para o conjunto dos três parâmetros (cor, turbidez e DQO) é apenas determinada estatisticamente. As condições ótimas do processo foram encontradas para o pH inicial 8, tempo de eletrólise

Tabela 1 - Fatores e níveis aplicados ao experimento.

Coeficiente	Parâmetros	Níveis		
		-1	0	1
x_1	Intensidade da Corrente (A)	1	2	3
x_2	pH	6	8	10
x_3	Tempo (min)	20	50	80

50 min e intensidade de corrente 2 A, obtendo reduções máximas de DQO, cor e turbidez de 92,00%, 99,63% e 99,16%, respectivamente.

Os modelos de segunda ordem, obtidos para as porcentagens de remoção dos parâmetros DQO, turbidez e cor, foram validados pela análise de variância (ANOVA) cujos resultados são apresentados na Tabela 3. Observa-se que os modelos foram considerados válidos, de acordo com o teste da razão F ($F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$), dentro do intervalo de confiança a 95% ($p < 0,05$).

De acordo com a análise estatística, para o efluente estudado nas condições experimentais testadas, os modelos matemáticos do processo de remoção da cor verdadeira, turbidez e DQO são resumidos pelas equações 5 a 7. A equação 5 representa a função resposta da porcentagem de remoção da cor verdadeira. Nesta equação observa-se que a porcentagem de remoção está sendo influenciada de forma quadrática pela intensidade

de corrente (x_1) e de forma linear e quadrática pelo pH da solução (x_2). De acordo com o coeficiente quadrático positivo da corrente elétrica, um incremento no valor da corrente favorece a maior remoção de cor da amostra. Entretanto, com os coeficientes linear (negativo) e quadrático (positivo) para o pH da solução, pode-se obter uma melhora da remoção da cor para valores intermediários de pH, sugerindo pH neutro.

$$\% R_{\text{Cor}} = 97,44 + 0,68x_1^2 - 1,4x_2 + 1,03x_2^2 \quad (5)$$

A função resposta da porcentagem de remoção da turbidez do efluente tratado via processo de eletrocoagulação, é representada pela equação 6. Conforme esta equação, a função resposta da turbidez é influenciada linearmente pelas variáveis intensidade de corrente e tempo de tratamento, além de uma ação combinada entre a intensidade de

Tabela 2 - Resultados do planejamento experimental completo 3³ para os experimentos EC.

Exp.	Corrente (A) (x_1)	pH (x_2)	Tempo (min) (x_3)	% de remoção Cor	% de remoção Turbidez	% de remoção da DQO
1	1	6	20	94,95	54,76	91,08
2	1	6	50	97,69	74,55	92,76
3	1	6	80	98,86	96,32	86,38
4	1	8	20	98,35	94,91	88,08
5	1	8	50	98,36	96,67	86,44
6	1	8	80	99,38	97,87	90,81
7	1	10	20	97,53	76,86	91,84
8	1	10	50	92,83	89,87	93,41
9	1	10	80	91,88	91,86	94,43
10	2	6	20	97,48	98,43	90,70
11	2	6	50	99,31	96,31	92,70
12	2	6	80	98,63	94,83	90,06
13	2	8	20	98,59	97,25	89,57
14	2	8	50	99,63	99,16	92,00
15	2	8	80	99,43	99,00	92,54
16	2	10	20	96,75	88,50	94,14
17	2	10	50	95,30	87,76	93,89
18	2	10	80	100,00	99,96	92,00
19	3	6	20	99,03	95,98	91,97
20	3	6	50	98,73	94,46	89,57
21	3	6	80	98,75	93,73	88,76
22	3	8	20	97,51	97,75	92,16
23	3	8	50	99,10	98,11	92,27
24	3	8	80	99,02	97,63	94,16
25	3	10	20	94,68	88,96	92,38
26	3	10	50	94,98	91,35	90,11
27	3	10	80	94,15	93,35	89,19

EC = eletrocoagulação; Exp = experimento; x_1 = corrente; x_2 = pH; x_3 = tempo.

corrente, pH e tempo de eletrólise. Assim os coeficientes lineares positivos e os coeficientes quadráticos positivos indicam a máxima remoção da turbidez para valores máximos de corrente elétrica e tempo de eletrólise; porém levando-se em consideração os coeficientes negativos no efeito combinado, sugere-se melhoramento na remoção da turbidez quando se utilizam baixos valores para as três variáveis do reator EC.

$$\begin{aligned} \%R_{\text{Turbidez}} = & 92,1 + 4,3x_1 + 2,7x_1^2 + 4,1x_2^2 \\ & + 4x_3 - 3,6x_1x_2 - 4,8x_1x_3 - 2,7x_1x_2^2 \end{aligned} \quad (6)$$

Para a remoção da DQO, a função resposta está representada pela equação 7. Por meio desta equação, observa-se que a porcentagem de remoção da DQO é influenciada pelas três variáveis do reator EC. O coeficiente quadrático positivo da intensidade de corrente sugere valores maiores de correntes para atingir máxima remoção da DQO. Entretanto, os coeficientes linear positivo e quadrático negativo, variáveis do pH, sugerem valores intermediários do pH no intuito de maximizar a remoção da DQO. Os coeficientes do efeito combinado entre as três variáveis do reator EC são em alguns termos positivos e em outros negativos, sugerindo uma região intermediária de valores para as três variáveis.

$$\begin{aligned} \%R_{\text{DQO}} = & 91,4 + 0,6x_1^2 + 0,8x_2 - 0,4x_2^2 - 0,7x_1x_2 + 1,3x_1x_2^2 - 0,3x_1^2x_2^2 + \\ & - 0,4x_1x_3 + 0,4x_1^2x_3 + 0,34x_1^2x_3^2 + 0,9x_2x_3 + 0,83x_2^2x_3 - 0,28x_2^2x_3^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Superfícies de respostas da porcentagem de remoção da cor, turbidez e DQO

Os Gráficos 2, 3 e 4, que correspondem às equações 5 a 7, apresentam as superfícies de respostas multiparamétricas da porcentagem de remoção da cor, turbidez e DQO, em função dos fatores (variáveis independentes) com $p < 0,05$ e das interações entre esses quando também significativas.

Considerando o tempo fixo em 50 min, quando a porcentagem de remoção da cor está sob a influência do pH e da corrente, conforme apresentado no Gráfico 2, a máxima porcentagem de sua remoção consta em uma região compreendida no pH entre 6 e 8,5, e o valor da corrente entre 1 e 3 A.

Considerando o pH inicial fixo em 8, quando a variação da porcentagem de remoção da turbidez sofre a influência do tempo e a intensidade de corrente (Gráfico 3), a máxima porcentagem de remoção da turbidez fica em uma região compreendida no tempo entre 60 e 80 minutos e o valor da corrente entre 2 e 3 A.

Mantendo constante o pH em 8 e considerando que a porcentagem de remoção da DQO sofre a influência do tempo de eletrólise e da intensidade de corrente, observa-se que nestas condições, a maior porcentagem de remoção da DQO fica localizada em uma região experimental com valor de corrente entre 1 a 2 A e tempo entre 60 e 80 min, conforme ilustrado no Gráfico 4.

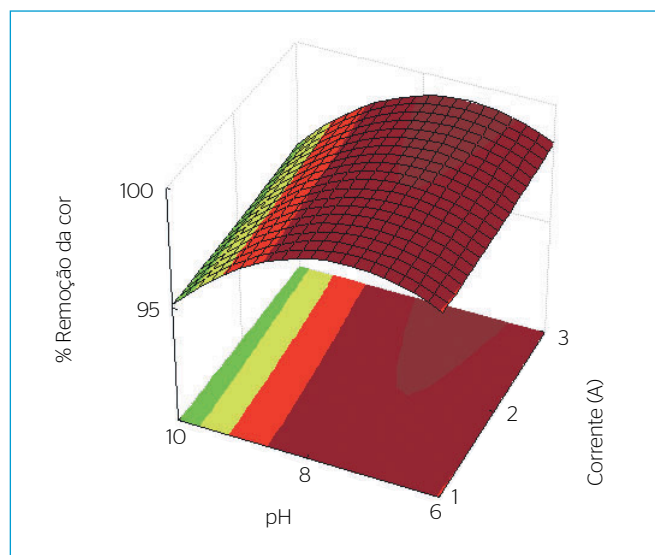


Gráfico 2 - Superfície de resposta, fixando o tempo em 50 min, para o percentual de remoção da cor verdadeira.

Tabela 3 - Análise de Variância do modelo de remoção da turbidez, cor e DQO.

Parâmetro	Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quad.	F Calc.	F Tab.	p-Valor
Cor	Regressão	72	3	24,13	9,95	3,3	2,14x10 ⁻⁴
	Erro	55,79	23	2,42			
	Total SS	128,19	26				
Turbidez	Regressão	1755	7	250,64	6,98	2,54	3,42x10 ⁻⁴
	Erro	681,91	19	35,89			
	Total SS	2436,42	26				
DQO	Regressão	88	7	12,59	6,30	2,54	6,40x10 ⁻⁴
	Erro	37,94	19	1,997			
	Total SS	126,04	26				

DQO, SS, Quad, Calc., Tab.

Efeito do tempo de reação no processo de eletrocoagulação

Utilizando as melhores condições operacionais testadas do processo de EC no tratamento de efluentes de abatedouro de aves (intensidade de corrente de 2 A e pH inicial de 8), foram obtidos dados de remoção da turbidez, cor e DQO em função do tempo, conforme apresentado no Gráfico 5. A partir do momento em que as porcentagens de remoção da cor, DQO e turbidez passam a ser constantes em relação ao tempo, para tempos de eletrólise acima de 30 min, foram observadas as máximas

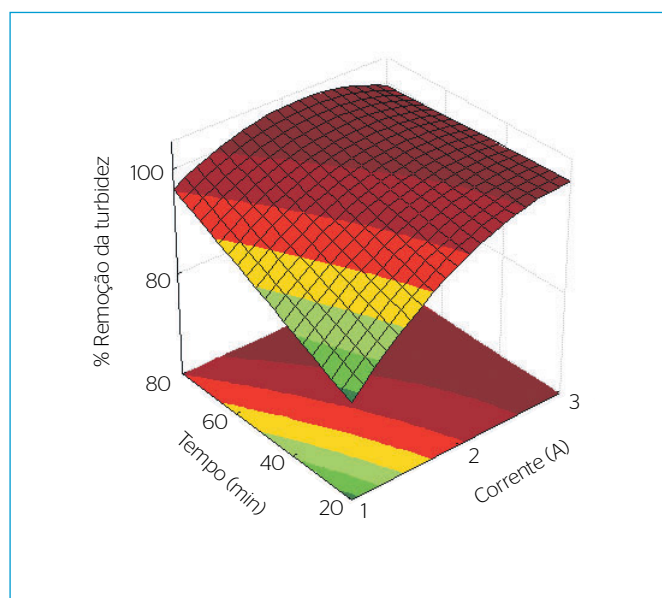


Gráfico 3 - Superfície de resposta, fixando o pH inicial em 8, para o percentual de remoção da turbidez.

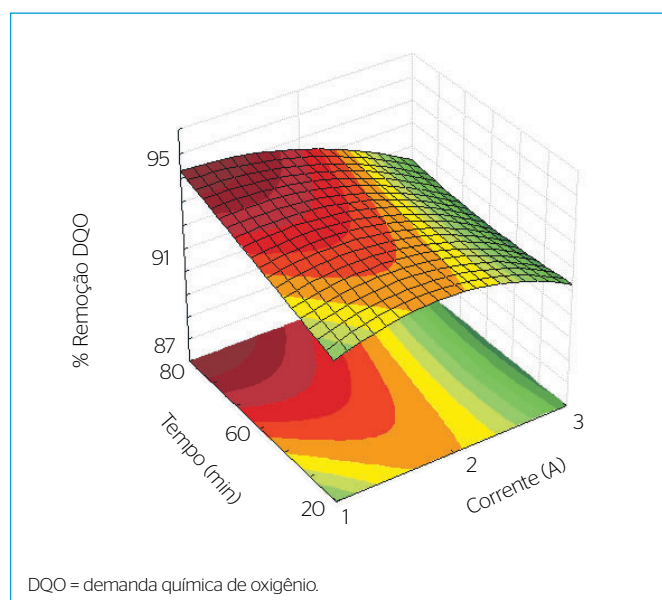


Gráfico 4 - Superfícies de resposta, fixando o pH inicial em 8, do percentual de remoção da DQO.

remoções de turbidez, cor e DQO. Comparando estes resultados com os apresentados no Gráfico 4 verifica-se que, após 10 min, na intensidade de 2 A, o tempo pouco influenciou na remoção da DQO, apenas a eficiência de remoção de DQO foi pouco superior com os dados obtidos do planejamento experimental. Além disso, observa-se que, no planejamento, o tempo ótimo foi de 50 min. Contudo, verifica-se pelo Gráfico 5 que, com uma pequena diminuição na eficiência de remoção das variáveis de resposta do tratamento EC, pode-se trabalhar com tempos de eletrólise menores na faixa de 30 a 50 min.

Padrões de lançamentos em corpos receptores

A Resolução CONAMA nº 357 (BRASIL, 2005) estabelece os padrões de lançamento de efluentes nos corpos hídricos brasileiros, fixando valores para a turbidez de até 100 unidades nefelométricas de turbidez (UNT) e pH entre 6,0 a 9,0, porém não fixa valores máximos para o parâmetro de cor e DQO. Entretanto, estabelece que o lançamento não modifique a característica original do corpo receptor, ou seja, visualmente não poderá haver alteração. A inexistência de valores para a cor e DQO tem causado dificuldades em classificar um efluente como próprio para o lançamento em corpos receptores.

Para as melhores combinações dos parâmetros testados: pH 8, intensidade de corrente de 2 A e tempo de eletrólise de 50 min, observou-se uma redução de 99,63% da cor, 99,16% da turbidez e 92% de remoção de DQO, ou seja, valores finais de 59,2 mg L⁻¹ Pt-Co de cor, 6,54 NTU de turbidez e 740 mgL⁻¹ de DQO. Verifica-se que os valores obtidos para os parâmetros cor e turbidez, após o processo de EC, encontram-se abaixo dos valores padrões estipulados para lançamentos de efluentes em corpos de receptores classe III, de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005. No entanto, devido ao elevado valor da DQO pode ser necessário um processo de pós-tratamento para uma maior redução da DQO.

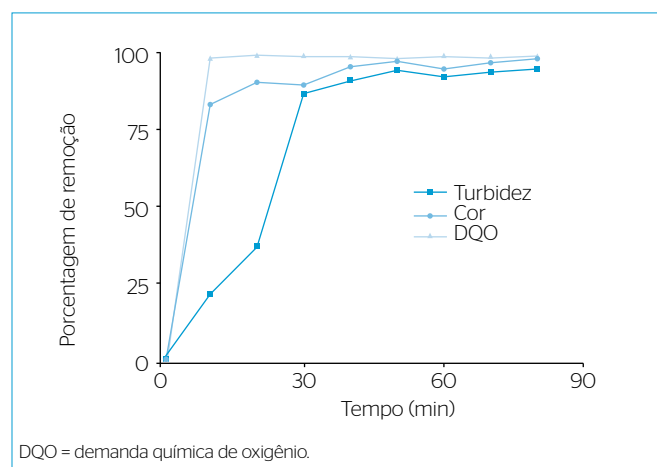


Gráfico 5 - Porcentagem de remoção da cor, turbidez e DQO em função do tempo de eletrólise para processo EC com intensidade de corrente de 2 A e pH inicial 8.

Análise de custo operacional

Para a análise de custo, foram utilizadas as equações 2 a 4. Nessa apreciação, foram consideradas as melhores condições de pH e intensidade de corrente obtidas pelo planejamento experimental. Assim, os cálculos foram avaliados para as seguintes condições experimentais: pH inicial 8, intensidade de corrente de 2 A, e tempos de eletrólise de 15, 30, 45, 50 e 60 minutos. Para manter uma corrente elétrica de 2 A circulando pelo meio aquoso (efluente), foi necessária a aplicação de uma tensão média de 12 V. Como o melhor valor do pH inicial (8) do efluente para o processo de EC está próximo do valor do pH do efluente bruto (6,6), o custo pela adição de reagentes químicos para corrigir o pH do efluente foi considerado desprezível na análise do custo total de operação quando comparado ao custo da energia elétrica e do material consumido.

Na análise do custo operacional total (equação 4) obteve-se da equação 2 que o preço da energia elétrica industrial (PEE) foi de R\$ 0,21/kWh, e da equação 3 que o preço do eletrodo de ferro (PME) foi de 5,5 R\$/kg.

O Gráfico 6 apresenta o custo de operação em função do tempo de eletrólise para o tratamento convencional (usando uma combinação de processos de filtração, coagulação química e sedimentação) e para o tratamento utilizando EC com eletrodos de ferro. Segundo dados da empresa em que foi coletado o efluente de abatedouro de aves, o tratamento convencional apresenta um custo médio de R\$ 13,0/m³.

Para as condições ótimas do processo de EC (entre as testadas), pH inicial 8,0, tempo de eletrólise de 50 minutos e intensidade de corrente de 2 A, observa-se que o custo total de operação é de R\$/m³ 3,36. Verifica-se pelo Gráfico 5 que o processo de eletrocoagulação mostrou-se mais econômico do que o tratamento convencional. Assim, o processo EC, além de se mostrar economicamente viável, apresenta a vantagem da redução do tamanho da estação de tratamento e a eliminação de produtos químicos normalmente empregados em grandes quantidades nos métodos convencionais de tratamentos.

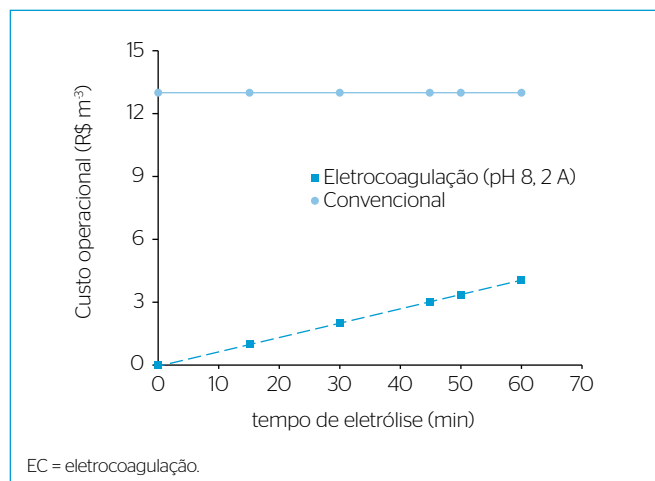


Gráfico 6 - Comparação entre o custo total de operação dos processos de EC (pH inicial 8 e 2A) e convencional para o tratamento de efluentes de abatedouro de aves.

CONCLUSÃO

Um planejamento experimental ³ foi realizado no tratamento de efluentes de abatedouro de aves pela técnica de eletrocoagulação, visando a obtenção das condições ótimas do processo. Os modelos de segunda ordem para a DQO, cor e turbidez foram validados pela ANOVA. A máxima eficiência alcançada na remoção da DQO (92%), cor (99,63%) e turbidez (99,16%) foi encontrada para os valores pH inicial 8,0, tempo de eletrólise de 50 minutos e intensidade de corrente de 2 A. Nestas condições, para os parâmetros cor e turbidez, o efluente tratado pela técnica EC atende à legislação e padrões de lançamentos em corpos receptores, classe III. No entanto, com relação à DQO, o efluente ainda necessita de um tratamento adicional. A análise do custo operacional indicou que o processo de EC apresenta um baixo custo operacional, podendo ser considerada como uma técnica alternativa e promissora a ser aplicada no tratamento de efluentes de abatedouros de aves.

REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1987) *NBR 9898/87: preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores* - Procedimento. Rio de Janeiro.

APHA (American Public Health Association); AWWA (American Water Works Association); WEF (Water Environment Federation). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21. ed. Washington: APHA, 2005.

BAYRAMOGLU, M.; EYVAZ, M.; KOBYA, M. (2007) Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation economical evaluation. *Chemical Engineering Journal*, v. 128, p. 155-161.

BORBA, F.H.; MANENTI, D.R.; MÓDENES, A.N.; MORA, N.D.; ESPINOZA-QUIÑONES, F.R.; PALÁCIO, S.M.; YASSUE, P.H.; NASCIMENTO, R. (2010) Avaliação da eficiência da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes de indústrias de subprodutos avícolas. *Estudos Tecnológicos*, v. 6, p. 36-47.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). (2005) Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*.

- CRESPILHO, F.N.; REZENDE, M.O.O. (2004) *Eletroflotação*: princípios e aplicações. São Carlos: RiMa. 96 p.
- ESPINOZA-QUIÑONES, F.R.; FORNARI, M.M.T.; MÓDENES, A.N.; PALÁCIO, S.M.; SILVA, F.G.; SZYMANSKI, N.; KROUMOV, A.D.; TRIGUEIROS, D.E.G. (2009a) Pollutant removal from tannery effluent by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*, v. 151, p. 59-65.
- ESPINOZA-QUIÑONES, F.R.; FORNARI, M.M.T.; MÓDENES, A.N.; PALÁCIO, S.M.; TRIGUEROS, D.E.G.; BORBA, F.H.; SZYMANSKI, N.; KROUMOV, A.D.K. (2009b) Electrocoagulation efficiency of the tannery effluent treatment using aluminium electrodes. *Water Science & Technology*, v. 60, n. 8, p. 2173-2185.
- ESPINOZA-QUIÑONES, F.R.; MÓDENES, A.N.; THEODORO, P.S.; PALÁCIO, S.M.; TRIGUEROS, D.E.G.; BORBA, C.E.; ABUGDERAH, M.M.; KROUMOV, A.D. (2012) Optimization of the iron electro-coagulation process of Cr, Ni, Cu, and Zn galvanization by-products by using response surface methodology. *Separation Science and Technology*, v. 47, p. 688-699.
- GE, J.; QU, J.; LEI, P.; LIU, H. (2004) New bipolar electrocoagulation-electroflotation process for the treatment of laundry wastewater. *Separation and Purification Technology*, v. 36, n. 1, p. 33-39.
- ILHAN, F.; KURT, U.; APAYDIN, O.; GONULLU, M.T. (2008) Treatment of leachate by electrocoagulation using aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, v. 154, p. 381-389.
- MORENO-CASILLAS, H.A.; COCKE, D.L.; GOMES, J.A.G.; MORKOVSKY, P.; PARGA, J.R.; PETERSON, E. (2007) Electrocoagulation mechanism for COD removal. *Separation and Purification Technology*, v. 56, n. 2, p. 204-211.
- MURUGANANTHAN, M.; RAJU, G.B.; PRABHAKAR, S. (2004) Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electro coagulation. *Journal of Hazardous Materials*, v. 109, n. 1-3, p. 37-44.
- PALÁCIO, S.M.; QUINONES-ESPINOZA, F.R.; MÓDENES, A.N.; OLIVEIRA, C.C.; BORBA, F.H.; SILVA JR, F.G. (2009) Toxicity assessment from electro-coagulation treated-textile dye wastewaters by bioassays. *Journal of Hazardous Materials*, v. 172, n. 1, p. 330-337.
- PAULI, A.R.; ESPINOZA-QUIÑONES, F.R.; MÓDENES, A.N.; BORBA, C.E.; THEODORO, P.S. (2012) Aplicação do planejamento experimental no método de eletrocoagulação para a remoção de matéria orgânica de efluentes frigoríficos. *Engevista (UFF)*, v. 14, n. 3, p. 293-301.
- RAGHU, S.; BASHA, C.A. (2007) Chemical or electrochemical techniques, followed by ion exchange, for recycle of textile dye wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, v. 149, n. 2, p. 324-330.
- RAJU, G.B.; KARUPPIAH, M.T.; LATHA, S.S.; PARVATHY, S.; PRABHAKAR, S. (2008) Treatment of wastewater from synthetic textile industry by electrocoagulation - electrooxidation. *Chemical Engineering Journal*, v. 144, n. 1, p. 51-58.
- SHEN, F.; GAO, P.; CHEN, X. (2005) Removal of chromium (VI) from wastewater by combined electrocoagulation-electroflotation without a filter. *Separation and Purification Technology*, v. 43, n. 2, p. 117-123.
- UBABEF - União Brasileira de Avicultura. (2011) *Relatório UBABEF 2010/2011*. Disponível em: <<http://abpa-br.com.br/files/publicacoes/abb3e2660dca967053335727b0cf74fd.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2011.
- VALLADÃO, A.B.G.; FREIRE, D.M.G.; CAMMAROTA, M.C. (2007) Enzymatic pré-hydrolysis applied to the anaerobic treatment of effluents from poultry slaughterhouses. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 60, n. 4, p. 219-225.