

Aplicação da Técnica Eletro-floculação utilizando Eletrodos de Alumínio no Tratamento de Efluente de Indústria Avícola

Patrícia H. Yassue¹, Fernando H. Borba^{1*}, Diego R. Manenti^{1**}, Andréia Colombo¹, Aparecido N. Módenes¹, Fernando R. Espinoza-Quiñones¹, Soraya M. Palácio¹, Nora D. Mora²

¹Centro de Engenharias e Ciências Exatas – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Campus de Toledo - Rua da Faculdade, 645. Jardim Santa Maria – Toledo – PR – Brasil (*Bolsista PTI C&T/FPT) (**Bolsista Capes)

²Laboratório de Materiais – LAMAT – Universidade Estadual de Oeste do Paraná – UNIOESTE, Campus de Foz do Iguaçu - PR – Brasil

patricia.yassue@hotmail.com

Abstract. *In this work, an aluminum electrodes-based Electrocoagulation (EC) lab-scale system was studied for the treatment of high lipids load effluents from a food processing industry. Based on the reduction factor of chemical oxygen demand (COD), decolourisation, and turbidity, the EC reactor operational parameters such as current density, electrolysis time, and initial pH were optimized by applying a 3³ full factorial experimental design. At 43,9 A m⁻² current density, 20 min electrolysis time, and 2.8-3.3 initial pH range, the EC process has reached the highest efficiency, showing 98.5% COD reduction, 99.8% decolourisation and 99.5% turbidity reduction.*

Resumo. *Neste trabalho, foi estudado a Eletrofloculação (EF) com eletrodos de alumínio, em escala laboratorial, para o tratamento de efluentes com alta carga de lipídios gerados pela indústria avícola. Baseado no fator de redução da demanda química de oxigênio (DQO), descoloração e turbidez, foi aplicado um planejamento fatorial 3³ completo para otimizar os parâmetros operacionais do reator EF: densidade de corrente, tempo de eletrólise e pH inicial. Para a densidade de corrente em 43,9 A m⁻², o tempo de eletrólise de 20 minutos e pH inicial variando entre 2,8 a 3,3, o processo EF obteve elevada eficiência, apresentando 98,5% de redução da DQO, 99,8% de descoloração e 99,5% de redução da turbidez.*

1. Introdução

O processamento e/ou tratamento dos resíduos da indústria avícola tem sido uma das grandes preocupações do setor industrial. O efluente gerado nesse processo tem como característica principal um elevado teor de proteínas e lipídios, acarretando com isto, uma série de problemas, tais como: pH básico, coloração escura e elevadas concentração da demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO).

A técnica da eletro-floculação (EF) tem despertado bastante interesse, devido à sua simplicidade de operação e aplicação em diversas matrizes. Recentemente tem sido

investigadas perspectivas e possibilidades da utilização da EF no tratamento de efluentes industriais. A EF tem sido usada com sucesso no tratamento de poluentes orgânicos e inorgânicos, tais como: indústria têxtil [Can *et al* 2006, Raghu *et al* 2007, Bayramoglu *et al* 2007, Raju *et al* 2008, Soraya *et al* 2009], destilação de álcool [Yavuz *et al* 2007] e curtume [Espinoza-Quiñones *et al* 2009].

Nesse sentido, a principal finalidade deste trabalho é avaliar a eficiência da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluente de indústria avícola, utilizando eletrodo de alumínio. Através de um planejamento fatorial 3^3 completo foram avaliados os parâmetros DQO, descoloração e turbidez, a fim de otimizar as variáveis do processo EF: densidade de corrente ($A\ m^{-2}$), tempo de eletrólise (min.) e pH inicial do efluente.

2. Materiais e métodos

2.1 Coleta e caracterização do efluente

O efluente utilizado nesta pesquisa foi coletado em uma indústria avícola, situada na região de Assis Chateaubriand - PR. Todas as análises físico-químicas foram realizadas de acordo com a metodologia descrita no APHA (2005), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Metodologias utilizadas nas análises laboratoriais

Parâmetros	Unidade	Metodologia
DQO	mg L ⁻¹	Digestivo Refluxo Fechado
Cor	Pt-Co	Colorímetro
Turbidez	NTU	Nefelométrico

Fonte: (APHA, 2005)

2.2 Produção experimental

Para realização dos experimentos de eletro-floculação, em batelada, foi utilizado um reator com altura de 14,4 cm, diâmetro de 11,6 cm e volume de 900 ml (Becker de borossilicato). Na parte superior do reator foi acoplada uma tampa com suporte para posicionar os eletrodos a uma distância fixa de 4 cm. Utilizou-se uma fonte de alimentação de corrente contínua, Instrutemp DC Power Supply – FA 1030, com carga máxima de 10 A. Os eletrodos constituem-se de duas placas de alumínio, com altura de 12,2 cm, largura de 7 cm e espessura de 1,8 mm com área superficial entre placas de 45,5 cm².

Antes da realização de cada experimento, foi ajustado o pH inicial utilizando as soluções padrões: NaOH (3M) e H₂SO₄ (3M).

2.3 Planejamento fatorial 3^3 e análise estatística dos resultados

Com o intuito de otimizar o processo e minimizar o número inicial de experimentos para obtenção dos melhores resultados das variáveis do reator (densidade de corrente, tempo de eletrólise e pH inicial), utilizou-se um planejamento fatorial 3^3 , descrito por Barros Neto *et al* (2007). Os níveis utilizados no planejamento estão apresentados na Tabela 2.

Os modelos propostos para a remoção da DQO obtido do planejamento experimental foram avaliados por uma análise de variáveis.

Tabela 2. Níveis das variáveis do reator eletro-floculação com eletrodos de alumínio

Variáveis	Coeficientes	Níveis		
		-	•	+
pH inicial	q_1	2	3	4
Tempo de eletrólise (min.)	q_2	20	40	60
Densidade de corrente ($A\ m^{-2}$)	q_3	43,9	65,9	87,9

3. Resultados e Discussão

3.1 Valores obtidos na caracterização inicial

Os resultados dos parâmetros medidos (DQO, Cor e Turbidez) na caracterização inicial do efluente, são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados da caracterização inicial do efluente da indústria avícola

Parâmetros	Valor	Unidade
DQO	8600 ± 324	$mg\ L^{-1}$
Cor	13920 ± 428	Pt-Co
Turbidez	2170 ± 138	NTU

3.2 Planejamento fatorial 3^3

Os dados analíticos dos experimentos de eletro-floculação, utilizando eletrodos de alumínio, realizados de acordo com as condições experimentais apresentadas na Tabela 4, foram avaliados para obtenção dos parâmetros significativos, principais efeitos e interações, e também modelos de correlação entre as variáveis do reator e efluente ao intervalo de confiança de 95% ($p < 0,05$).

Os resultados obtidos no planejamento fatorial apresentam valores de 98,4%, 99,8% e 99,1% de redução da DQO, Cor e Turbidez, respectivamente para o experimento oito. Estes resultados apresentaram uma elevada redução dos parâmetros estudados neste planejamento, com o tempo de eletrólise de 20 minutos e densidade de corrente de $65,9\ A\ m^{-2}$. As respostas experimentais, baseadas nos valores de redução da DQO, permitiram o desenvolvimento estatístico com a análise dos efeitos das interações entre as variáveis dos processos.

Tabela 4. Resultados dos experimentos de Eletro-floculação no planejamento fatorial 3^3

EXP.	Variáveis			Remoção da DQO (%)	Remoção da cor (%)	Remoção da turbidez (%)
	q_1	q_2 (min)	q_3 ($A\ m^{-2}$)			
1	4	60	87,9	94,3	97,2	74,8
2	4	60	65,9	95,8	99,1	96,1
3	4	60	43,9	97,7	99,7	99,5
4	4	40	87,9	93,1	99,9	99,7

5	4	40	65,9	97,7	97,5	71,6
6	4	40	43,9	96,0	99,6	98,9
7	4	20	87,9	94,7	99,5	97,7
8	4	20	65,9	98,4	99,8	99,1
9	4	20	43,9	98,4	99,4	97,6
10	3	60	87,9	97,0	97,4	77,6
11	3	60	65,9	95,1	97,6	81,0
12	3	60	43,9	97,8	99,7	99,2
13	3	40	87,9	98,0	99,1	93,4
14	3	40	65,9	94,7	98,3	77,7
15	3	40	43,9	96,9	99,7	98,8
16	3	20	87,9	94,8	98,1	75,0
17	3	20	65,9	92,4	98,5	83,3
18	3	20	43,9	96,6	98,0	80,5
19	2	60	87,9	94,5	97,9	88,5
20	2	60	65,9	96,8	97,5	85,3
21	2	60	43,9	95,2	98,2	83,9
22	2	40	87,9	93,9	96,8	68,6
23	2	40	65,9	96,4	97,6	74,8
24	2	40	43,9	96,4	97,4	80,3
25	2	20	87,9	96,9	97,9	78,4
26	2	20	65,9	97,0	97,5	76,8
27	2	20	43,9	94,3	97,7	81,2

Os modelos de correlação entre os parâmetros significativos e as variáveis experimentais, pH inicial, tempo de eletrólise e densidade de corrente, foram validados através da análise de variância (ANOVA). Para que o modelo (Equação 1) seja considerado válido dentro do intervalo de confiança pré-estabelecido o fator resultante da análise de ANOVA ($F_{\text{calculado}}$) deve ser maior que o fator de Student (F_{tabelado}), considerando os graus de liberdade referentes aos parâmetros significativos (regressão) e aos resíduos, conforme apresentado na Tabela 5.

$$DQO = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i a_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N b_{ij} q_i q_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N w_{ijk} q_i q_j q_k + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N v_{ij} q_i^2 q_j^2 \quad (1)$$

Tabela 5. Análise de variância (ANOVA) obtido para a remoção da DQO (%), pela técnica da eletro-floculação com nível de significância de 95% ($p < 0,05$)

Parâmetro	Fontes de Variação	Soma dos Quadrados (SQ)	Grau de Liberdade (GL)	Quadrados Médios (SQ/GL)	F	
					Calculado (QMR/QMr)	Tabelado
DQO	Regressão	181,05	7	25,86	45,14	2,12
	Resíduos	41,82	73	0,57		
	Total	222,87	80			

Sendo o $F_{\text{calculado}}$ (45,14) > F_{tabelado} (2,12), podemos afirmar que o modelo (Equação 1) para o parâmetro da DQO é válido para um intervalo de confiança de 95%. Na Tabela 6, estão apresentados os efeitos das interações das variáveis pH inicial (q_i),

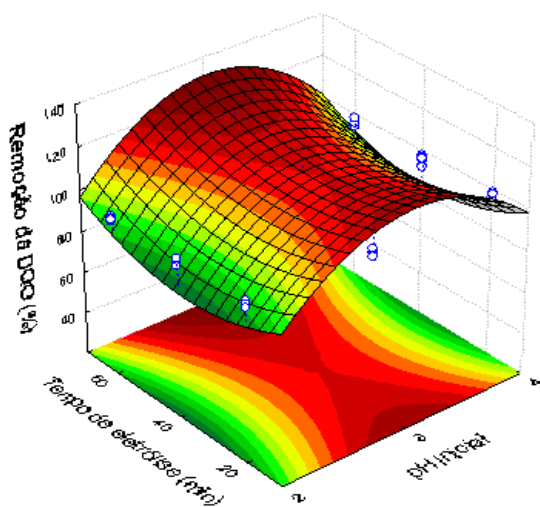
tempo de eletrólise (q_2) e densidade de corrente (q_3) na forma linear (n_n) e na quadrática (n_n)ⁿ.

Tabela 6. Efeitos das interações entre as variáveis de processo para a remoção da DQO (%) pela técnica da eletro-floculação com nível de significância de 95% ($p < 0,05$)

Parâmetros	Coefficientes	Valor	Desvio padrão	$t_{exp.}$	p-valor
q_0	a_0	95,85	0,158	606,428	<0,01
q_1	a_1	0,217	0,194	1,121	<0,01
$(q_1)^2$	b_{11}	1,373	0,168	8,192	<0,01
q_2	a_2	-0,110	0,194	0,566	0,57
$(q_2)^2$	b_{22}	-0,304	0,168	-1,816	0,07
q_3	a_3	-0,743	0,224	-3,324	<0,01
$(q_1)^2 \times q_2$	w_{112}	0,738	0,119	6,226	<0,01
$(q_1)^2 \times (q_2)^2$	v_{12}	0,433	0,103	4,217	<0,01
$q_1 \times q_3$	b_{13}	-0,930	0,274	-3,397	<0,01
$(q_1)^2 \times q_3$	w_{113}	2,457	0,237	10,364	<0,01
$(q_1)^2 \times (q_3)^2$	v_{13}	-2,122	0,205	-10,333	<0,01

A análise apresenta o efeito positivo para pH inicial ($a_1 > 0$, ver Tabela 6), sugerindo que os melhores resultados para a redução da DQO podem ser obtidos com o aumento do pH inicial. O efeito negativo ($a_2, a_3 < 0$, ver Tabela 6), sugere os menores valores da densidade de corrente e do tempo de eletrólise para obter a melhor eficiência do processo EF. Os resultados obtidos no planejamento foram plotados em gráficos 3-D segundo o modelos estatístico previsto, as superfícies de resposta são apresentadas na Figura 1. Na Figura 1 (a), os melhores resultados são obtidos com pH inicial entre 2,8 e 3,2 e tempo de eletrólise nos intervalos de 5 à 45 minutos. A Figura 1 (b) apresenta a melhor eficiência na remoção da DQO com densidade de corrente entre 40 a 70 $A m^{-2}$ e tempo de eletrólise de 5 à 20 minutos.

(a)



(b)

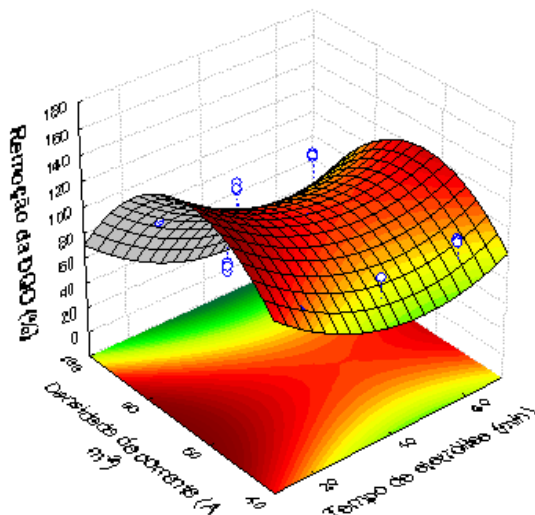


Figura 1. Superfície de resposta na remoção da DQO (%), avaliadas através das variáveis: (a) pH inicial vs Tempo de eletrólise (min) e (b) Tempo de eletrólise (min) vs Densidade de corrente ($A\ m^{-2}$).

Segundo a análise estatística, a melhor eficiência da técnica EF para a remoção dos poluentes do efluente da indústria avícola é obtida com o pH inicial 3,0, densidade de corrente de $43,9\ A\ m^{-2}$ e tempo de eletrólise em 20 minutos.

4. Conclusões

O planejamento fatorial 3^3 completo determinou as condições ótimas de processo sendo: pH inicial 3,0 ; tempo de eletrólise de 20 minutos e densidade de corrente de $43,9\ A\ m^{-2}$. Nestas condições o processo EF obteve valores de 98,4%, 99,8% e 99,1% de redução da DQO, Cor e Turbidez, respectivamente.

Os melhores resultados na remoção da DQO, cor e turbidez obtidos nos menores tempos de eletrólise e com baixa densidade de corrente, geram com isso, uma ótima eficiência a um menor custo operacional para o tratamento do efluente avícola utilizando a técnica EF.

Agradecimentos

CNPq, CAPES e Fundação Parque Tecnológico Itaipu – PTI C&T/FPT, pelo apoio financeiro.

Referências

- APHA, AWWA, WPCF. (2005). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st ed., American Public Health Association, Washington, DC.
- Barros Neto, Benício, Scarminio, Ieda Spacino, Bruns, Roy Edward. (2007). Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. – 3º Ed. – Campinas, SP: Editora da UNICAMP.
- Bayramoglu, M., Eyvaz, M., Kobya, M. (2007). Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation Economical evaluation. *Chemical Engineering Journal*. 128. 155–161 p.
- Can, O. T., Kobya, M., Demirbas, E., Bayramoglu, M. (2006). Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere*. 62. 181–187 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. (2009). Pollutant removal from tannery effluent by Electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*. 151. 59-65 p.
- Raghu, S., Basha, C. A. (2007). Chemical or electrochemical techniques, followed by ion exchange, for recycle of textile dye wastewater. *Journal Hazardous Materials*. 149. 324–330 p.
- 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*. 144. 51–58 p.

- Soraya, M. P., Espinoza-Quiñones, F. R., Módenes, A. N., Cláudio, C. O., Fernando. H. B., Fernando. G. S. (2009). Toxicity assessment from electro-coagulation treated-textile dye wastewaters by bioassays. *Journal Hazardous Materials*. Article in Press.
- Yavuz, Y. (2007). EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater, *Sep. Purif. Technol.* 53. 135–140 p.