



## **Otimização das variáveis da Eletrofloculação para a redução dos parâmetros DQO, cor e turbidez de efluentes da indústria de processamento de subprodutos frigoríficos**

**Patrícia H. Yassue, Andréia Colombo, Fernando H. Borba, Diego R. Manenti, Aparecido N. Módenes**

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. NBQ – Núcleo de Biotecnologia e Desenvolvimento de Processos Químicos. Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. [patricia.yassue@hotmail.com](mailto:patricia.yassue@hotmail.com)

### **Resumo**

Os processos das indústrias de subprodutos frigoríficos geram efluentes com alta concentração de poluentes que requerem um tratamento adequado minimizando os impactos no meio ambiente. Dentre as técnicas de tratamento, destaca-se a Eletrofloculação (EF), devido à elevada degradação de compostos orgânicos e inorgânicos. Desta forma, este trabalho tem como objetivo estudar a EF utilizando eletrodos de alumínio em escala laboratorial para o tratamento de efluentes da indústria de processamento de subprodutos frigoríficos. Baseado nos resultados de redução da demanda química de oxigênio (DQO), descoloração e turbidez, obtidos na aplicação de um planejamento fatorial  $3^3$ , foram otimizados os parâmetros operacionais do reator EF: densidade de corrente, tempo de eletrólise e pH inicial. Para a densidade de corrente em  $43,9 \text{ A m}^{-2}$ , o tempo de eletrólise de 20 minutos e pH inicial variando entre 2,8 a 3,3, o processo EF obteve elevada eficiência, com 98,5% de redução da DQO, 99,8% de descoloração e 99,5% de redução da turbidez.

Palavras-chave: Tratamento de efluentes. Eletrólise. Planejamento experimental.

Área Temática: Tecnologias Ambientais.

### **Abstract**

*The industries process of subproducts from frigorifics stores generates effluents with high concentrations of pollutants which require appropriate treatment minimizing the impacts on the environment. Among the techniques of treatment, highlight the Eletrofloculação (EF), due to higher degradation of organic and inorganic compounds. Thus, this work aims to study the EF using aluminum electrodes in laboratory scale for treatment of effluent from industry of subproducts from frigorifics stores. Based on the results of reducing chemical oxygen demand (COD), discoloration and turbidity, from the use of a  $3^3$  factorial design, the operation parameters of the EF reactor were optimized: current density, electrolysis time and initial pH. For the current density at  $43.9 \text{ A m}^{-2}$ , electrolysis time 20 minutes and initial pH ranging from 2.8 to 3.3, the EF process got high efficiency, with 98.5% reduction in COD, 99.8% of discoloration and 99.5% reduction of turbidity.*

*Key words: Wastewater treatment. Electrolysis. Experimental design.*

*Theme Area: Ambiental Management in Industry*



## 1 Introdução

Os processos da indústria frigorífica, especialmente a avícola, requerem grandes volumes de água ao longo da cadeia produtiva, gerando quantidades significativas de efluentes, que se caracterizam por elevado teor de proteínas e lipídios (AMANTE *et al.*, 1999). Estes poluentes são os principais responsáveis por alterações dos parâmetros de controle ambiental como pH, sólidos totais, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), entre outros (PEREIRA, 2004).

A redução da carga destes compostos orgânicos têm sido estudada com o objetivo de evitar problemas ecológicos e toxicológicos ao meio ambiente e a saúde humana (BANAT *et al.*, 1996 & CARNEIRO *et al.*, 2004 *apud* PASCHOAL *et al.*, 2005). Neste sentido, a tecnologia de tratamento físico-químico pelo processo eletrolítico é uma alternativa promissora para o atendimento aos padrões ambientais, uma vez que não necessita da adição de produtos químicos, requer baixo tempo de detenção, e possui mecanismos mais simplificados que os tratamentos convencionais (MOLLAH *et al.*, 2001). Esta técnica, consiste na aplicação de um potencial elétrico na solução dos efluentes através de eletrodos metálicos, promovendo a dissolução deste metal com a geração de íons e gases.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência da técnica de eletrofloculação (EF), utilizando eletrodos de alumínio, no tratamento de efluentes de indústrias de processamento de subprodutos frigoríficos. Através de um planejamento fatorial  $3^3$  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 Metodologia

### 2.1 Materiais

Foram coletados 25 litros do efluente proveniente de uma indústria frigorífica localizada na cidade de Assis Chateaubriand – PR., Brasil. Todos os reagentes utilizados para a análise apresentavam grau de pureza analítica.

### 2.2 Reator eletrolítico

O equipamento de eletrofloculação consistiu em uma célula eletrolítica, uma fonte de alimentação de corrente contínua da marca Instrutemp DC Power Supply – FA 1030, com carga máxima de 10 A. No reator de vidro com capacidade de 1L (Becker de borossilicato) foi inserido verticalmente dois eletrodos de alumínio com altura de 12,2 cm, largura de 7 cm e espessura de 1,8 mm com área superficial entre placas de  $45,5\ cm^2$ . Os eletrodos foram separados por espaçadores a uma distância fixa de 4 cm.

### 2.3 Procedimento experimental

O pH inicial do efluente foi ajustado com o auxílio de NaOH (3M) e  $H_2SO_4$  (3M) conforme estabelecido no planejamento experimental. Após a adição do efluente no reator eletrolítico, o sistema foi mantido sob agitação constante por meio de um agitador magnético.

### 2.4 Planejamento experimental

Para otimizar as variáveis do processo EF (densidade de corrente, tempo de eletrólise e pH inicial) foi realizado um planejamento fatorial  $3^3$  completo com triplicadas no ponto central, avaliando os valores de redução dos parâmetros DQO, descoloração e turbidez. Os níveis obtidos através de testes preliminares estão apresentados na Tabela 1.



Tabela 1 - 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

### 2.5 Determinações analíticas

Todas as análises físico-químicas realizadas tanto para a caracterização inicial do efluente bruto como a dos experimentos realizados no planejamento fatorial foram realizadas de acordo com a metodologia descrita no Standard Methods (APHA, 2005). O pH foi medido utilizando um pH metro digital (Tecnal TEC-2). A demanda química de oxigênio foi determinada pelo refluxo fechado/método colorimétrico. A turbidez (Nephelometric Turbidity Unit, NTU) foi determinada com um turbidímetro Tecnal, modelo TB1000. A análise dos teores de sólidos foi realizada através do método gravimétrico. Para a análise dos sólidos Totais (ST), uma porção homogênea do efluente tratado foi evaporada em um banho de vapor e em seguida seca em estufa. Os Sólidos Totais (ST) foram obtidos pela Equação 1

$$ST(mgL^{-1}) = \frac{(P_2 - P_1) * 1000}{V_a} \quad (1)$$

onde  $P_2$  corresponde a diferença entre a massa final da cápsula após a evaporação e secagem da amostra,  $P_1$  é a massa da cápsula vazia inicialmente e  $V_a$  é o volume do efluente adicionada à capsula inicial. Os sólidos totais fixos (STF) são obtidos pela ignição do resíduo total e é dada pela Equação 2.

$$STF(mgL^{-1}) = \frac{(P_3 - P_1) * 1000}{V_a} \quad (2)$$

e  $P_3$  corresponde a diferença entre a massa final do recipiente após a calcinação da amostra. E, os Sólidos Totais Voláteis (STV) são obtidos pela diferença entre os sólidos totais e os sólidos totais fixos conforme a Equação 3.

$$STV(mgL^{-1}) = ST(mgL^{-1}) - STF(mgL^{-1}) \quad (3)$$

## 3 Resultado 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 2.

Tabela 2 - Resultados da caracterização inicial do efluente da indústria avícola

Parâmetros	Valor	Unidade
DQO	$8600 \pm 324$	$mg\ L^{-1}$
Cor	$13920 \pm 428$	Pt-Co
Turbidez	$2170 \pm 138$	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 3.



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% ( $p < 0,05$ ).

De acordo com a Tabela 3, no experimento oito, obteve-se 98,4%, 99,8% e 99,1% de redução da DQO, Cor e Turbidez, respectivamente. Tendo com isto uma elevada redução dos parâmetros estudados neste planejamento, com o tempo de eletrólise de 20 minutos e densidade de corrente de  $65,9 \text{ A m}^{-2}$ . 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 3 - Resultados dos experimentos de Eletro-floculação no planejamento fatorial  $3^3$

EXP.	Variáveis			Remoção da DQO (%)			Remoção da	Remoção da
	$q_1$	$q_2$ (min.)	$q_3$ ( $\text{A m}^{-2}$ )	A	B	C	Cor	Turbidez
1	4	60	87,9	94,3	93,6	94,0	97,2	74,8
2	4	60	65,9	95,8	95,4	95,7	99,1	96,1
3	4	60	43,9	97,7	98,2	97,8	99,7	99,5
4	4	40	87,9	93,1	92,9	92,7	99,9	99,7
5	4	40	65,9	97,7	97,6	97,4	97,5	71,6
6	4	40	43,9	96,0	95,8	96,3	99,6	98,9
7	4	20	87,9	94,7	94,5	95,2	99,5	97,7
8	4	20	65,9	98,4	98,3	98,5	99,8	99,1
9	4	20	43,9	98,4	98,5	98,3	99,4	97,6
10	3	60	87,9	97,0	96,9	96,9	97,4	77,6
11	3	60	65,9	95,1	94,9	94,7	97,6	81,0
12	3	60	43,9	97,8	97,7	97,5	99,7	99,2
13	3	40	87,9	98,0	98,0	97,9	99,1	93,4
14	3	40	65,9	94,7	94,6	94,8	98,3	77,7
15	3	40	43,9	96,9	97,0	96,9	99,7	98,8
16	3	20	87,9	94,8	94,6	94,4	98,1	75,0
17	3	20	65,9	92,4	92,2	92,3	98,5	83,3
18	3	20	43,9	96,6	96,4	96,3	98,0	80,5
19	2	60	87,9	94,5	94,6	94,6	97,9	88,5
20	2	60	65,9	96,8	96,7	96,6	97,5	85,3
21	2	60	43,9	95,2	95,5	95,3	98,2	83,9
22	2	40	87,9	93,9	93,5	93,6	96,8	68,6
23	2	40	65,9	96,4	96,2	96,3	97,6	74,8
24	2	40	43,9	96,4	96,1	96,4	97,4	80,3
25	2	20	87,9	96,9	97,1	97,2	97,9	78,4
26	2	20	65,9	97,0	97,2	95,8	97,5	76,8
27	2	20	43,9	94,3	94,1	94,0	97,7	81,2

A função resposta do modelo estatístico proposto é representada por gráficos 3-D, conforme apresentado na Figura 1.

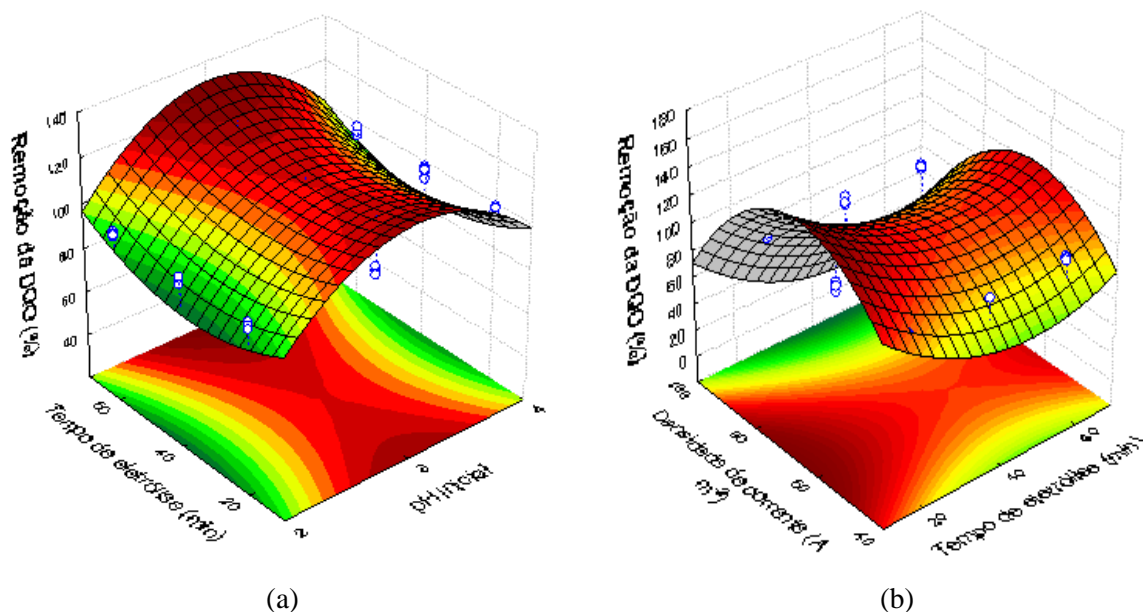


Figura 1. Superfície de resposta na remoção da DQO (%), avaliadas através das variáveis: (a) pH inicial em função Tempo de eletrólise (min.) e (b) Tempo de eletrólise (min.) vs Densidade de corrente ( $A m^{-2}$ ).

Na Figura 1 (a), as variáveis apresentam melhores resultados 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 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.

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 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 ( $F_{\text{tabelado}}$ ), considerando os graus de liberdade referentes aos parâmetros significativos (regressão) e aos resíduos, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Análise de variância (ANOVA) obtido para a remoção da DQO (%), pela técnica da eletrofloculação 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  $F_{\text{calculado}} (45,14) > F_{\text{tabelado}} (2,12)$ , podemos afirmar que o modelo (Equação 4) para o parâmetro da DQO é válido para um intervalo de confiança de 95%. Na Tabela 5, estão apresentados os efeitos das interações das variáveis pH inicial ( $q_1$ ), tempo de eletrólise ( $q_2$ ) e densidade de corrente ( $q_3$ ) na forma linear ( $n$ ) e na quadrática ( $n$ )<sup>n</sup>.

$$DQO = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i q_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N b_{ij} q_i q_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N w_{ijk} q_i q_j q_k + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N v_{ij} q_i^2 q_j^2 \quad (4)$$

Tabela 5. 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 5), 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 5), sugere os menores valores da densidade de corrente e do tempo de eletrólise para obter a melhor eficiência do processo EF.

Segundo a análise estatística, a melhor eficiência da técnica EF para a remoção dos poluentes do efluente de curtume é obtida com o pH inicial 3,0, densidade de corrente de 43,9 A m<sup>-2</sup> e tempo de eletrólise em 20 minutos

#### 4 Conclusão

O planejamento fatorial 3<sup>3</sup> determinou as condições ótimas de processo: pH inicial 3,0 ; tempo de eletrólise de 20 minutos e densidade de corrente de 43,9 A m<sup>-2</sup>, obtendo assim os melhores resultados na remoção da DQO, cor e turbidez, nos menores tempo de eletrólise e densidade de corrente proposto no planejamento, gerando com isso uma ótima eficiência e menor custo no tratamento do efluente avícola.

#### Agradecimentos

À CAPES pelo apoio financeiro.

#### Referências

AMANTE, E.R.; CASTILHO JR, A.B.; KANZAWA, A.; ENSSLIN, L.; MURAKI, M. *Um panorama da tecnologia limpa na indústria de frangos*. Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 33, n. 1, p. 16-21., 1999.

APHA, AWWA, WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21st ed., American Public Health Association, Washington, DC., 2005.

BANAT, I. M.; NIGAM, P; SHING, D.; MARCHANT, R.; *Bioresour. Technol.* 58, 217, 1996.



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.

CARNEIRO, P. A.; OSUGI, M. E.; SENE, J. J.; ANDERSON, M. A.; ZANONI, M. V. B.; *Electrochim. Acta*, 49, 3807, 2004.

CRESPILHO, F.N.; SANTANA, C.G.; REZENDE, O.O. *Tratamento de efluente da Indústria de Processamento de Coco utilizando Eletroflotação. Química Nova*, v.27 n.3, São Paulo May/June 2004.

FORNARI, M.M.T. **Aplicação da Técnica de Eletro-Floculação no Tratamento de Efluentes de Curtume.** Dissertação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2007.

MOLLAH, M.A.; SCHENNAC, R.; PARGA, J.R.; COCKE, D.L. *Electrocoagulation (EC) – science and applications. Journal of Hazardous Materials*. B 84 (1): 29–41, 2001.

PASCHOAL, F.M.M.; TREMILOSI-FILHO, G. *Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. Instituto de Química de São Carlos*, v. 28 no.5, São Paulo, Sept./Oct. 2005.

SILVA, A. L. C., **Processo eletrolítico: Uma alternativa para o tratamento de águas residuárias**, 60f. Monografia de Especialização em Química Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.