

# **Avaliação da eficiência da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de indústrias de subprodutos avícolas**

***Assessment of the performance on the poultry industrial by-product effluent  
treatment by the electrocoagulation technique***

## **Fernando Henrique Borba**

Mestrando em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná/UNIOESTE  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UNIOESTE  
Rua da Faculdade 645, Jardim La Salle, 85903-000, Toledo, PR, Brasil  
fhorba@yahoo.com.br

## **Diego Ricieri Manenti**

Mestrando em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná/UNIOESTE  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UNIOESTE  
Rua da Faculdade 645, Jardim La Salle, 85903-000, Toledo, PR, Brasil  
diegomanenti@hotmail.com

## **Aparecido Nivaldo Módenes**

Dr. em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química/Unicamp  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UNIOESTE  
Rua da Faculdade 645, Jardim La Salle, 85903-000, Toledo, PR, Brasil  
modenes@unioeste.br

## **Nora Díaz Mora**

Pós-Dr<sup>a</sup>. em Ciências e Engenharia dos Materiais/UFSCAR  
Laboratório de Materiais – LAMAT da UNIOESTE  
Av. Tarquínio Joslin dos Santos 1300, 85870-900, Foz do Iguaçu, PR, Brasil  
noradiaz@unioeste.br

## **Fernando Rodolfo Espinoza-Quinõnes**

Pós-Dr. em Física, Universidade Estadual de Londrina/UEL  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UNIOESTE  
Rua da Faculdade 645, Jardim La Salle, 85903-000, Toledo, PR, Brasil  
f.espinoza@terra.com.br

## **Soraya Moreno Palácio**

Dr<sup>a</sup>. em Química, Universidade Estadual de Maringá/UEM  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UNIOESTE  
Rua da Faculdade 645, Jardim La Salle, 85903-000, Toledo, PR, Brasil  
palacio@unioeste.br

## **Patrícia Hissae Yassue**

Graduando em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná/UNIOESTE  
Centro de Engenharias e Ciências Exatas da UNIOESTE  
Rua da Faculdade 645, Jardim La Salle, 85903-000, Toledo, PR, Brasil  
patricia.yassue@hotmail.com

## **Rogério do Nascimento**

Mestrando em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná/UNIOESTE  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UNIOESTE  
Rua da Faculdade 645, Jardim La Salle, 85903-000, Toledo, PR, Brasil  
rogenasc@hotmail.com

## Resumo

Neste trabalho foi avaliado a eficiência do processo da Eletro-floculação utilizando eletrodos de alumínio para o tratamento de efluente de uma indústria avícola. Para estimar a eficiência do processo foram avaliados os seguintes parâmetros: DQO, descoloração, turbidez, condutividade e pH final. A fim de obter o desempenho ótimo do reator na remoção máxima de poluentes foi aplicado um planejamento experimental completo  $3^3$  avaliando os efeitos da densidade de corrente ( $A\ m^{-2}$ ), tempo de eletrólise (min) e pH inicial do efluente em relação a eficiência de remoção da DQO. Em condições experimentais de pH inicial 4, tempo de eletrólise de 20 minutos e densidade de corrente de  $43,9\ A\ m^{-2}$  obteve-se redução de 98,4%, 99,4% e 97,6% da DQO, cor e turbidez, respectivamente.

**Palavras-chave:** eletro-floculação, tratamento de efluente, planejamento experimental completo, subprodutos avícolas.

## Abstract

In this work, an aluminum electrodes-based Electrocoagulation (EC) lab-scale system was applied for the treatment of poultry industry effluents containing a high load of lipids. As main physicochemical parameters of poultry effluent the chemical oxygen demand (COD), color and turbidity were used, assessing the performance of the EC based-treatment system. A  $3^3$  factorial experimental design was carried out for the optimization of the EC-reactor operating parameters (current density, electrolysis time, and initial pH) based on the COD and turbidity removal and decolourisation values. Under the EC experimental conditions of  $43,9\ A\ m^{-2}$  current density, 20 min electrolysis time, and 4 initial pH, the EC process has reached the highest efficiency, showing 98.4% COD reduction, 99.4% decolourisation and 97.6% turbidity reduction.

**Key words:** electrocoagulation, treatment effluent, factorial design, by-products of poultry processing industry.

## 1. Introdução

É crescente a preocupação mundial com a conservação do meio ambiente devido à aceleração do crescimento populacional e as atividades industriais acarretando a geração de resíduos sólidos e/ou líquidos altamente tóxicos e não biodegradáveis que necessitam serem tratados. Atualmente as normas ambientais têm imposto restrições cada vez maiores aos despejos de efluentes que contêm substâncias orgânicas e inorgânicas nos corpos de água que comprometam a qualidade do ecossistema aquático que serve de meio para o desenvolvimento da flora e fauna nela existente, e conseqüentemente ao ser humano por fazer parte da cadeia alimentícia ou fazer uso dela.

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) (Drogui *et al.*, 2008). O tratamento convencional físico-químico utilizado para remoção de poluentes orgânicos contidos em efluentes de indústria de alimentos é baseado na maioria das vezes na aplicação de técnica coagulação/flotação, causando assim uma poluição secundária devido à adição de produtos químicos no tratamento.

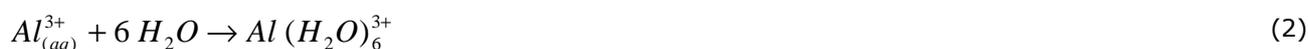
A técnica da Eletro-floculação (EF) tem despertado bastante interesse devido à sua simplicidade de operação e aplicação em diversas matrizes. Recentemente tem sido investigadas perspectivas e possibilidades da utilização da EF no tratamento de efluentes industriais. O processo da EF em um reator com o arranjo de eletrodos de metal (Al ou Fe) proporciona um ambiente físico/químico permitindo a desestabilização do

poluente pela oxidação eletrolítica e sua coagulação, adsorção, precipitação e flutuação subseqüentes, evitando a introdução de um outro agente coagulante (Mollah *et al.*, 2004; Rodriguez *et al.*, 2007). A presença de complexos de alumínio em solução aquosa confere uma característica gelatinosa ao meio. Esses complexos são responsáveis por remover contaminantes, pelo fato de adsorverem-se às partículas, originando coágulos maiores (flocos). Porém, a estabilidade do hidróxido de alumínio depende do pH do meio (Crespilho *et al.*, 2004). A seguir, são apresentadas as equações que descrevem as etapas de hidrólise do alumínio, podendo-se notar que na Equação 4 vários complexos de Al são formados na hidrólise do alumínio.

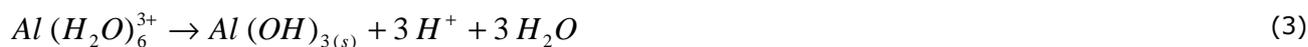
Oxidação do Al sólido (reação anódica)



Solvatação do cátion



Formação do agente coagulante



Reações secundárias



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; Palácio *et al.*, 2009), indústria de alimentos (Drogui *et al.*, 2008), destilação de álcool (Yavuz *et al.*, 2007) e curtume (Espinoza-Quñones *et al.*, 2009).

Neste trabalho, serão apresentados os resultados do tratamento eletroquímico utilizando eletrodo de alumínio aplicado no efluente de uma indústria de subprodutos avícolas. Para estimar a eficiência do processo da Eletro-floculação foram avaliados os seguintes parâmetros físico-químicos: DQO, descoloração, turbidez, condutividade e pH final. A fim de obter o desempenho ótimo do reator na remoção máxima de poluentes foi aplicado um planejamento experimental completo  $3^3$  avaliando os efeitos da densidade de corrente ( $A m^{-2}$ ), tempo de eletrólise (min) e pH inicial do efluente em relação a eficiência de remoção da DQO.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1. Coleta, caracterização e preservação das amostras

O efluente utilizado nesta pesquisa foi fornecido por uma indústria avícola, localizada na região de Assis Chateaubriand – PR. O efluente bruto foi coletado no tanque de equalização da estação de tratamento da indústria, antes do tratamento físico-químico. A determinação analítica dos parâmetros físico-químicos da DQO ( $\text{mg L}^{-1}$ ), cor (Pt-Co), Turbidez (NTU), Condutividade ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) e pH, foram caracterizados antes e após o tratamento eletroquímico. As metodologias utilizadas na caracterização dos parâmetros físico e químicos (DQO, cor, Turbidez, condutividade e pH) e a preservação, prazo de análise e acondicionamento das amostras do efluente bruto e do efluente tratado pela técnica da Eletro-floculação, foram baseadas nos procedimentos descritos no *Standard Methods for Examination of Water & Wastewater* (APHA, 2005).

### 2.2. Procedimento experimental

Os experimentos do processo da EF utilizando eletrodos de alumínio aplicado em efluente de uma indústria de subprodutos avícolas foram realizados em sistema batelada com coletores de amostras. O reator de escala laboratorial é constituído por um becker de 1000 mL. Na parte superior do reator foi acoplado uma tampa com suporte para posicionar os eletrodos a uma distância fixa de 4 cm. Para a alimentação da corrente elétrica aplicada no processo foi utilizada uma fonte de corrente contínua de modelo Instrutemp DC Power Supply – FA 1030, com carga máxima de 10 A. Os eletrodos constituem-se de duas placas de alumínio (12,2 cm x 7,0 cm x 1,8 mm) com área superficial entre placas de  $45,5 \text{ cm}^2$ , conforme apresentado na Figura 1.

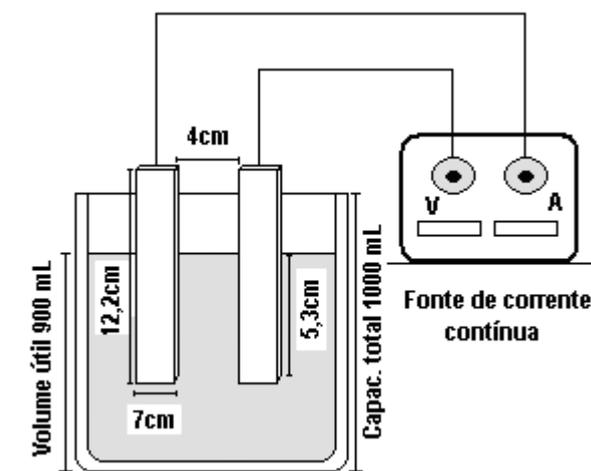


Figura 1: Reator utilizado no processo da Eletro-floculação para o tratamento do efluente avícola.

Antes de cada batelada experimental o pH inicial do efluente foi ajustado utilizando as soluções padrões de NaOH (3 M) e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (3M). Para a realização dos experimentos da EF foram adicionados 900 mL do efluente bruto no reator eletroquímico juntamente com os eletrodos. Após o tempo de reação determinado para cada experimento as amostras foram filtradas com auxílio de uma bomba a vácuo (Primatec/ar rotativa mod.131 tipo 2 vc) e submetidas as análises físico-químicas, conforme estabelecidas na Tabela 1.

### 2.3. Planejamento experimental completo 3<sup>3</sup>

Para minimizar o número inicial dos experimentos realizados nesta pesquisa e obter as condições ótimas dos parâmetros operacionais do reator ( $P_{OR}$ ), do processo da Eletro-floculação foi aplicado um planejamento experimental completo 3<sup>3</sup> (PEC). A metodologia utilizada neste trabalho, para o desenvolvimento do planejamento experimental completo 3<sup>3</sup>, está descrita em Barros Neto *et al.*, (2007).

Os níveis das variáveis do processo da Eletro-floculação (pH inicial, tempo de eletrólise (min) e densidade de corrente ( $A m^{-2}$ )) foram determinados a partir de testes experimentais, realizados em laboratório. No PEC 3<sup>3</sup> foi avaliada a importância dos parâmetros operacionais do reator no processo da Eletro-floculação. Os três parâmetros estudados foram o pH inicial (2, 3 e 4), tempo de eletrólise (20, 40 e 60 min) e densidade de corrente (43,9, 65,9 e 87,9  $A m^{-2}$ ), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Níveis e valores das variáveis (pH inicial, tempo de eletrólise (min) e densidade de corrente ( $A m^{-2}$ )) do processo da Eletro-floculação utilizados no planejamento experimental completo 3<sup>3</sup>.

Variáveis de processo	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

Seguindo a metodologia aplicada neste planejamento experimental foram realizados ao todo 27 experimentos para o processo da EF utilizando eletrodos de alumínio, conforme apresentado na Tabela 3. A eficiência do processo eletroquímico foi investigada através da remoção dos parâmetros DQO, cor e turbidez, sendo também monitorados o pH e a condutividade final do efluente tratado.

Os resultados das análises da DQO obtidas através dos experimentos realizados no planejamento experimental completo 3<sup>3</sup> foram avaliados pelo pacote estatístico "Statistica Copyright 1984-2000 by statsoft, Inc," no modo "experimental design", sendo realizada a análise de superfície de resposta (Figura 2 e 3), análise de variância (ANOVA) (Tabela 4) e interações dos principais efeitos das variáveis em relação à eficiência de remoção da DQO (Tabela 5). O parâmetro da DQO utilizada como uma variável de resposta no PEC 3<sup>3</sup>, foi investigada pelo método estatístico, pois este parâmetro é o mais importante em relação aos demais (cor e turbidez). A DQO expressa a quantidade de matéria orgânica que foi reduzida no tratamento do efluente avícola.

### 3. Resultados e Discussão

A caracterização inicial do efluente bruto da indústria de subprodutos avícolas apresentou uma alta concentração de matéria orgânica. Os parâmetros analisados foram a DQO, cor, turbidez, condutividade e pH final do efluente, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2: Valores dos parâmetros físico-químicos na caracterização do efluente sem tratamento da indústria avícola.

Parâmetro	Valor
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	8600 ± 324
Cor (Pt-Co)	13920 ± 428
Turbidez (NTU)	2170 ± 138
Condutividade (mS cm <sup>-1</sup> )	5,7
pH	7,7

O planejamento experimental completo 3<sup>3</sup> e as análises estatísticas aplicadas nos dados experimentais da DQO verificaram as condições ótimas das variáveis (pH inicial, tempo de eletrólise (min) e densidade de corrente (A m<sup>-2</sup>)) de processo da Eletro-floculação. Pode se observar que em pH inicial 4, tempo de eletrólise de 20 minutos e densidade de corrente de 43,9 A m<sup>-2</sup> obteve-se redução de 98,4%, 99,4% e 97,6% da DQO, cor e turbidez, respectivamente. Quando ocorre um aumento no tempo de eletrólise para 60 minutos e da densidade de corrente para 87,9 A m<sup>-2</sup> suas respectivas remoções são de 94,3%, 97,2% e 74,8%, tendo com isso um decréscimo na eficiência do processo da Eletro-floculação. Quando ocorre um aumento do tempo de eletrólise e da densidade de corrente à condutividade aumenta proporcionalmente, estando estes dois fatores influenciando diretamente no acréscimo da condutividade, conforme apresentado na Tabela 3.

As respostas experimentais baseadas nos valores de redução da DQO permitiram o desenvolvimento estatístico com análise das superfícies de resposta entre tempo de eletrólise (min) em função do pH inicial, mantendo constante a densidade de corrente de 43,9 A m<sup>-2</sup> (Figura 2) e densidade de corrente em função do tempo de eletrólise (min), mantendo constante o pH inicial 4 (Figura 3).

Tabela 3: Condições experimentais do processo da Eletro-floculação, realizados a partir do planejamento experimental completo 3<sup>3</sup>, com seus respectivos resultados das análises da DQO, Cor e Turbidez apresentados em (%) de remoção.

Exper.	Variáveis de processo			% de remoção dos parâmetros			Valores medidos	
	pH q <sub>1</sub>	Tempo q <sub>2</sub> (min)	Densidade de corrente q <sub>3</sub> (A m <sup>-2</sup> ).	DQO	Cor	Turbidez	Condutividade (μS cm <sup>-1</sup> )	pH final
1	4	60	87,9	94,3	97,2	74,8	11,5	5,8
2	4	60	65,9	95,8	99,1	96,1	7,8	5,6
3	4	60	43,9	97,7	99,7	99,5	7,2	6,4
4	4	40	87,9	93,1	99,9	99,7	9,3	7,0
5	4	40	65,9	97,7	97,5	71,6	8,0	5,9
6	4	40	43,9	96,0	99,6	98,9	7,6	6,2
7	4	20	87,9	94,7	99,5	97,7	8,3	6,2
8	4	20	65,9	98,4	99,8	99,1	8,0	6,8
9	4	20	43,9	98,4	99,4	97,6	9,0	6,3
10	3	60	87,9	97,0	97,4	77,6	8,0	5,7
11	3	60	65,9	95,1	97,6	81	10,0	5,2
12	3	60	43,9	97,8	99,7	99,2	15,3	7,0
13	3	40	87,9	98,0	99,1	93,4	10,5	6,3
14	3	40	65,9	94,7	98,3	77,7	11,3	5,5

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

Na Figura 2, verifica-se que o tempo de eletrólise pouco influenciou na eficiência de remoção da DQO, pois como verificado no experimento 9 (Tabela 3) com 20 minutos de reação obteve-se 98,4 % de eficiência no processo e quando se teve um aumento no tempo de eletrólise a eficiência diminuiu para aproximadamente 97%, nas mesmas condições de processo (Tabela 3, experimento 5). O melhor pH inicial do efluente que apresenta melhores resultados em relação a remoção da DQO está na faixa de 2,8 e 3,2.

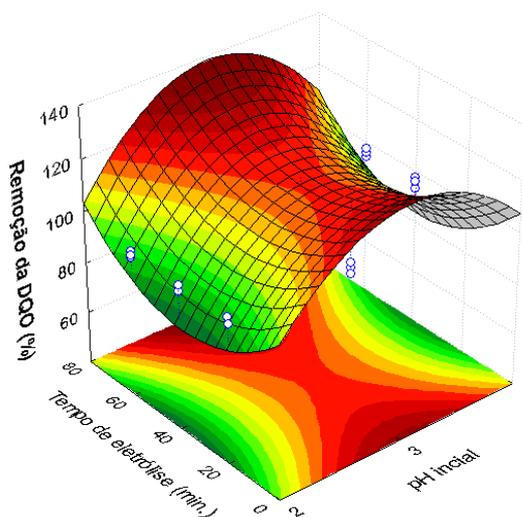


Figura 2: Superfície de resposta dos dados experimentais obtidas no planejamento experimental completo  $3^3$ , em função da remoção da DQO. Mantendo constante a densidade de corrente de  $43,9 \text{ A m}^{-2}$ .

Na Figura 3, a densidade de corrente em relação ao tempo de eletrólise teve sua importância evidenciada, pois em densidade acima de  $80 \text{ A m}^{-2}$  o processo da EF tem sua eficiência reduzida em relação a remoção da DQO, apresentando com isso a melhor eficiência com densidade de corrente entre  $40$  à  $78 \text{ A m}^{-2}$  e tempo de eletrólise de  $5$  à  $20$  minutos.

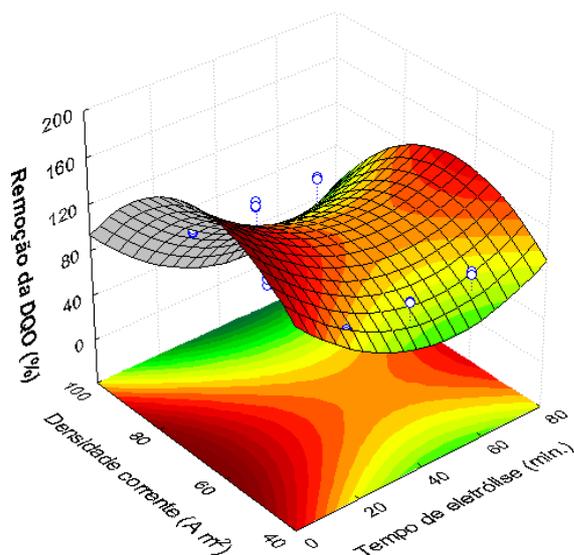


Figura 3: Superfície de resposta dos dados experimentais obtidas no planejamento experimental completo  $3^3$ , em função da remoção da DQO. Mantendo constante o pH inicial no valor de 4.

Verifica-se nas Figuras 2 e 3, que as variáveis de processo que mais influenciaram positivamente na remoção da DQO foram o pH inicial e a densidade de corrente. Os modelos de correlação entre os parâmetros significativos e as variáveis experimentais do processo da EF: 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 (95%  $p < 0,05$ ) 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: Teste da análise de variância (2-way ANOVA) do modelo previsto no processo da Eletro-floculação para os valores de remoção da DQO (%), 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
	Regressão	181,05	7	25,86	45,14	2,12
DQO	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 5) para o parâmetro da DQO é válido para um intervalo de confiança de 95%. Na Tabela 5, estão apresentados os efeitos das variáveis pH inicial ( $q_1$ ), tempo de eletrólise ( $q_2$ ) e densidade de corrente ( $q_3$ ), e suas respectivas interações.

As respostas experimentais baseadas nos valores de redução do parâmetro da DQO obtida no planejamento experimental completo  $3^3$  permitiram o desenvolvimento de um modelo estatístico (ver Equação 5), com o

ajuste linear ( $n_n$ ) e quadrático ( $n_n$ )<sup>n</sup> dos efeitos das interações entre os coeficientes associados aos valores dos  $P_{OR}$ , conforme apresentado na Tabela 5.

$$DQO = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i a_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N b_{ij} q_i q_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N w_{ijk} q_i q_j q_k + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N v_{ij} q_i^2 q_j^2 \quad (5)$$

A Tabela 5 apresenta os efeitos das interações entre as variáveis do processo da Eletro-floculação em relação as respostas experimentais de remoção da DQO. Verifica-se que em termo linear apenas o parâmetro  $q_3$  apresenta um nível de significância de 95% ou seja, um  $p < 0,05$ , seu valor negativo ( $a_3 = -0,744$ ) indica que para se obter uma ótima eficiência do processo, deve-se utilizar uma densidade de corrente baixa (43,9 A m<sup>-2</sup>). A interação linear ( $q_1 \times q_3$ ) do coeficiente  $b_{13}$ , também apresenta um  $p$ -valor  $< 0,01$ . A interação dos termos quadrático x linear ( $(q_1)^2 \times q_3$  e  $(q_1)^2 \times q_3$ ) dos coeficientes  $w_{113}$  e  $w_{112}$ , também apresentaram um  $p$ -valor ( $< 0,01$ ) significativo para nível de significância de 95%. Em termos de interações quadráticas podemos verificar que apenas os coeficientes  $v_{13}$  e  $v_{12}$  apresentaram valores significativos. Observa-se que os demais parâmetros em sua forma linear, quadrática e suas respectivas interações não apresentaram efeitos significantes para o modelo proposto, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Efeito das interações entre as variáveis de processo (pH inicial ( $q_1$ ), tempo de eletrólise ( $q_2$ ) e densidade de corrente ( $q_3$ )) para a remoção da DQO (%) pelo processo da Eletro-floculação com nível de significância de 95% ( $p < 0,05$ ).

Parâmetros	Coefficientes	Valor	Desvio padrão	t <sub>exp.</sub>	p-valor
$q_0$	$a_0$	95,853	0,158	607,094	$< 0,01$
$(q_1)^2 \times q_3$	$w_{113}$	2,458	0,236	10,380	$< 0,01$
$(q_1)^2 \times (q_3)^2$	$v_{13}$	-2,122	0,205	-10,347	$< 0,01$
$(q_1)^2$	$b_{11}$	1,374	0,168	8,205	$< 0,01$
$(q_1)^2 \times q_2$	$w_{112}$	0,737	0,118	6,228	$< 0,01$
$(q_1)^2 \times (q_2)^2$	$v_{12}$	0,432	0,102	4,218	$< 0,01$
$q_1 \times q_3$	$b_{13}$	-0,927	0,273	-3,392	$< 0,01$
$q_3$	$a_3$	-0,744	0,224	-3,334	$< 0,01$
$(q_2)^2 \times q_3$	$w_{223}$	-0,450	0,236	-1,900	0,062
$(q_2)^2 \times (q_3)^2$	$v_{23}$	0,386	0,205	1,882	0,064
$(q_2)^2$	$b_{22}$	-0,303	0,168	-1,813	0,074
$q_1 \times q_2$	$b_{12}$	-0,236	0,137	-1,726	0,089
$q_1 \times (q_2)^2$	$w_{122}$	-0,173	0,118	-1,466	0,147
$q_1$	$a_1$	0,218	0,194	1,130	0,262
$q_2$	$a_2$	0,111	0,194	0,574	0,567
$q_2 \times q_3$	$b_{23}$	-0,144	0,273	-0,528	0,599
$q_2 \times (q_3)^2$	$w_{233}$	-0,100	0,236	-0,422	0,674
$q_1 \times (q_3)^2$	$w_{133}$	0,077	0,236	0,328	0,743
$(q_3)^2$	$b_{33}$	0,040	0,193	0,210	0,833

Verifica-se que o efeito positivo para pH inicial ( $a_1 > 0$ ), sugere-se que para obter uma ótima eficiência no processo na redução da DQO, deve-se ocorrer um aumento do pH inicial. O efeito negativo ( $a_2, a_3 < 0$ ), sugere os menores valores da densidade de corrente e do tempo de eletrólise para obter a melhor eficiência do processo EF. De acordo com as análises estatísticas a melhor eficiência da técnica de eletro-floculação é obtida com o pH inicial 4, densidade de corrente de 43,9 A m<sup>-2</sup> e tempo de eletrólise em 20 minutos.

Para melhor visualização dos efeitos das interações lineares e quadráticas dos parâmetros avaliados, foi construído o gráfico de Pareto, conforme apresentado na Figura 4.

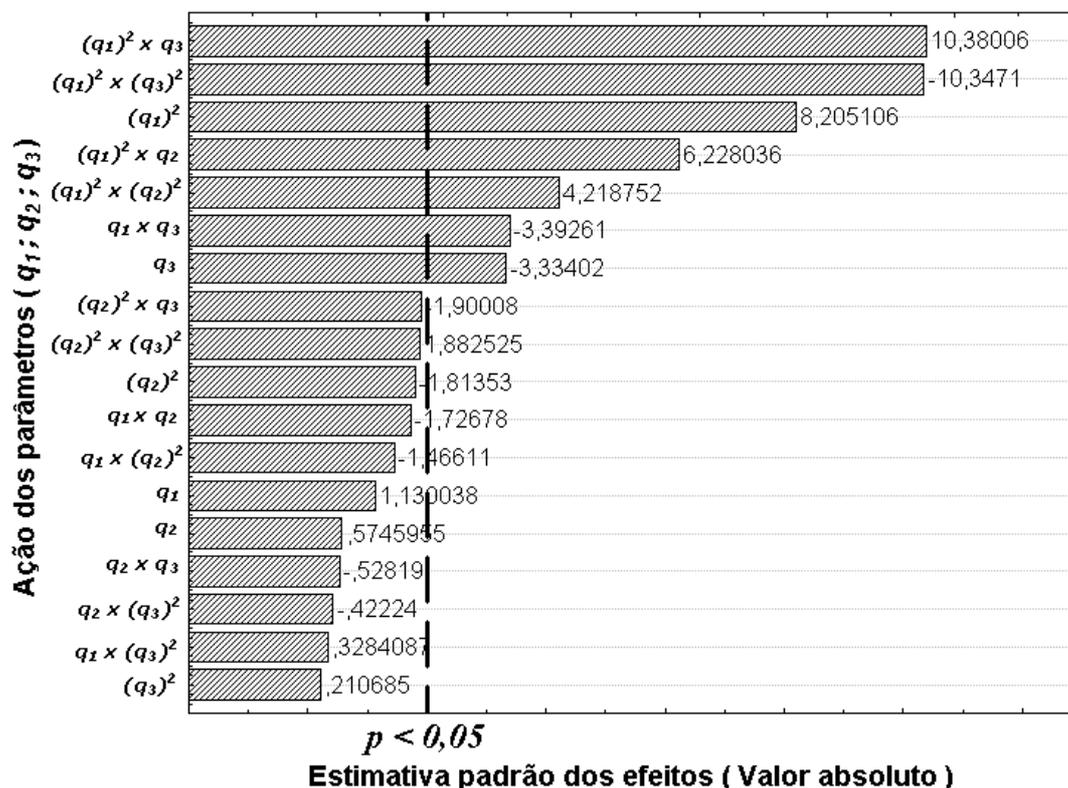


Figura 4: Gráfico de Pareto obtido no planejamento experimental completo 3<sup>3</sup>, apresentando a ação dos parâmetros ( $q_1; q_2; q_3$ ) no intervalo de confiança de 95% ( $p < 0,05$ ), em função da ação destes parâmetros na remoção da DQO.

Na Tabela 6, estão apresentados os valores dos parâmetros (DQO, cor, turbidez, condutividade e pH) antes e após o tratamento do efluente avícola via a técnica da Eletro-floculação, com suas respectivas eficiência de remoção (%).

Tabela 6: Comparação do efluente bruto com o efluente tratado pelo processo da Eletro-floculação nas condições experimentais de: pH inicial de 4, densidade de corrente de 43,9 A m<sup>-2</sup> e tempo de eletrólise de 20 min.

Parâmetro	Efluente bruto	Efluente tratado	Eficiência de remoção (%)
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	8600	137	98,4
Cor (Pt-Co)	13920	83	99,4
Turbidez (NTU)	2170	52	97,6
Condutividade (mS cm <sup>-1</sup> )	5,7	9,0	-
pH	7,7	6,3	-

## 4. Conclusão

A técnica da Eletro-floculação aplicada no tratamento do efluente da indústria de subprodutos avícolas apresentou ótima eficiência na remoção dos poluentes orgânicos, onde obteve-se aproximadamente 98 % da redução dos parâmetros DQO, cor e turbidez. Outro fator relevante nesta pesquisa foi o tempo de eletrólise e a densidade de corrente mínima utilizada para alcançar a ótima eficiência do processo, gerando com isso um menor custo operacional no tratamento do efluente.

O planejamento experimental completo <sup>3</sup> e as análises estatísticas determinaram as condições ideais das variáveis pH inicial, tempo de eletrólise (min) e densidade de corrente ( $A\ m^{-2}$ ), minimizando com isso o número de experimentos inicial a ser realizado.

## Agradecimentos

À Fundação Parque Tecnológico Itaipu – PTI C&T/FPTI e a CAPES, pelo apoio financeiro.

## Referências

- APHA. 2005. AWWA, WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21<sup>st</sup> ed., Washington, DC, American Public Health Association, 1325 p.
- BARROS, N.; SCARMINIO, B.; SPACINO, I.; BRUNS, R.E. 2007. *Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. 3<sup>a</sup> ed., Campinas, Editora da UNICAMP, 480 p.
- BAYRAMOGLU, M.; EYVAZ, M.; KOBYA, M. 2007. Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation Economical evaluation. *Chemical Engineering Journal*, **128**(2-3):155–161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2006.10.008>
- CAN, O.T.; KOBYA, M.; DEMIRBAS, E.; BAYRAMOGLU, M. 2006. Treatment of the textile wastewater by combined electrocoagulation. *Chemosphere*, **62**(2):181-187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.05.022>
- CRESPILHO, F.N.; SANTANA, C.G.; REZENDE, M.O.O. 2004. Tratamento de efluente de indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. *Química Nova*, **27**(3):387-392. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422004000300005>
- DROGUI, P.; ASSELIN, M.; BRAR, S.K.; BENMOUSSA, H.; BLAIS, J.F. 2008. Electrochemical removal of pollutants from agro-industry wastewaters. *Separation and Purification Technology*, **61**(3):301-310. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2007.10.013>
- 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**(1-3):59-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2009.01.043>
- MOLLAH, M.Y.A.; MORKOVSKY P.; GOMES, J.A.G.; KESMEZ, M.; PARGA, J.; COCKE, D.L. 2004. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, **114**(1-3):199-210. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.009>

- PALACIO, S.M.; ESPINOZA-QUIÑONES, F.R.; MÓDENES, A.N.; CLÁUDIO, C.O.; BORBA, F.H.; FERNANDO, G.S. 2009. Toxicity assessment from electro-coagulation treated-textile dye wastewaters by bioassays. *Journal Hazardous Materials*, [no prelo].
- RAGHU, S.; BASHA, C.A. 2007. Chemical or electrochemical techniques, followed by ion exchange, for recycle of textile dye wastewater. *Journal Hazardous Materials*, **149**(2):324-330. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.087>
- 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**(1):51-58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2008.01.008>
- RODRIGUEZ, J.; STOPIÉ, S.; KRAUSE, G.; FRIEDRICH, B. 2007. Feasibility assessment of electrocoagulation towards a new sustainable wastewater treatment. *Environmental Science and Pollution Research*, **14**(7):477-482. <http://dx.doi.org/10.1065/espr2007.05.424>
- YAVUZ, Y. 2007. EC and EF processes for the treatment of alcohol distillery wastewater. *Separation and Purification Technology*, **53**(1):135-140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2006.08.022>

Submissão: 08/03/2010  
Aceite: 20/03/2010