



11º SIMPÓSIO  
INTERNACIONAL  
DE QUALIDADE  
AMBIENTAL

02 A 04 DE  
OUTUBRO  
PORTO ALEGRE-RS  
TEATRO DA PUCRS



TEMA  
meio ambiente,  
política & economia

## ELETROFLOCULAÇÃO COM USO DE ELETRODO DE ALUMÍNIO NO TRATAMENTO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE CURTUME: OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL E SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

**Débora Barbosa Pavão** – deborapavao13@hotmail.com

Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) *campus* Cerro Largo/RS  
Rua Jacob Reinaldo Haupenthal, 1580 | Bairro São Pedro  
CEP 97900-000 - Cerro Largo – Rio Grande do Sul  
Universidade Federal da Fronteira Sul

**Laura Behling** – laurabehling@live.com

Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) *campus* Cerro Largo/RS

**Alcione Aparecida de Almeida Alves** – alcione.almeida@uffs.edu.br

Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) *campus* Cerro Largo/RS

**Aline Raquel Müller Tones** – aline.tones@uffs.edu.br

Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) *campus* Cerro Largo/RS

**Bárbara Luiza Brandenburg dos Santos** – barbara.brandenburg@outlook.com

Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) *campus* Cerro Largo/RS

**Resumo:** A indústria de curtume é um dos principais setores da economia brasileira, no entanto é considerada altamente poluidora devido à complexidade dos efluentes gerados nos processos produtivos em virtude do alto teor de matéria orgânica, sólidos, óleos e graxas, cromo, entre outros. Desta forma, este estudo visa avaliar a eficiência o tratamento de eletrofloculação (EF) com o uso de eletrodos de alumínio por meio da remoção das variáveis dependentes cor aparente, turbidez e Demanda Química de oxigênio (DQO), sob diferentes condições das variáveis independentes: corrente elétrica, tempo de tratamento e distância entre os eletrodos. Realizou-se o planejamento experimental <sup>23</sup>, incluindo 6 ensaios nos pontos axiais e 3 ensaios no ponto central, de acordo com o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) totalizando 17 ensaios. Por meio da ANOVA, comprovou-se com confiabilidade de 95 %, a influência das variáveis independentes na máxima remoção das variáveis dependentes. A função desejabilidade global determinou uma condição otimizada com corrente de 3,99 A, tempo de tratamento 4,8 min e distância entre os eletrodos de 6,52 cm, com isso alcançou-se um remoção de 94,2 % da cor aparente, 94,3 % para a turbidez e 74,02 % para a DQO, a qual reforça a viabilidade da EF como tecnologia de tratamento de águas residuais de curtume.

**Palavras-chave:** Efluente de curtume. Eletrofloculação. DCCR. Desejabilidade global.

Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br  
abes-rs@abes-rs.org.br  
(51) 3212.1375



11º SIMPÓSIO  
INTERNACIONAL  
DE QUALIDADE  
AMBIENTAL

02 A 04 DE  
OUTUBRO  
PORTO ALEGRE-RS  
TEATRO DA PUCRS



TEMA  
meio ambiente,  
política & economia

## ELETRIFLOCCULAÇÃO COM O USO DE ALUMÍNIO ELETRODO NA TRATAMENTO DO EFLUENTE DA INDÚSTRIA DE CURTUME: OTIMIZAÇÃO EXPERIMENTAL E RESPOSTA DE SUPERFÍCIE

**Abstract:** *The tannery industry is one of the main sectors of the Brazilian economy, however it is considered highly polluting due to the complexity of the effluents generated in the production processes due to the high content of organic matter, solids, oils and greases, chromium, among others. So, this study aims to evaluate the efficiency of electroflocculation (EF) treatment with the use of aluminum electrodes by removing the dependent variables apparent color, turbidity and Chemical Demand of Oxygen (COD) under different conditions of the independent variables: electrical current, treatment time and distance between the electrodes. The experimental design was  $2^3$ , including 6 tests at the axial points and 3 tests at the central point, according to the Rotational Central Compound Design (DCCR), totaling 17 trials. Through ANOVA, the influence of the independent variables on the maximum removal of the dependent variables was confirmed with 95% reliability. The overall desirability function determined an optimized condition with current of 3.99 A, treatment time of 4.8 min and distance between the electrodes of 6.52 cm, whereby a removal of 94.2% of the apparent color was achieved, 94.3% for turbidity and 74.02% for COD, which reinforces the viability of EF as a tanner wastewater treatment technology.*

**Keywords:** *Tanning Effluent. Electroflocculation. DCCR. Desirability global.*

### 1. INTRODUÇÃO

A preocupação mundial com o meio ambiente cresce a cada dia a medida em que as atividades agrícolas e o desenvolvimento industrial tornam os problemas ambientais maiores e mais frequentes, devido à disposição inadequada de resíduos sólidos e o lançamento de efluentes em corpos hídricos.

Dentre as diversas atividades desenvolvidas pelos seres humanos, as indústrias são consideradas grandes consumidoras de recursos hídricos. Esse elevado consumo acaba gerando efluentes com necessidade de disposição final ambientalmente adequada (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Destaca-se como atividade industrial com elevado consumo de água e geração efluentes a indústria de curtume, considerada ainda como atividade altamente poluidora, por utilizar produtos tóxicos, como o cromo no beneficiamento do couro. Os efluentes gerados são compostos principalmente por matérias orgânicas, sólidos, óleos e graxas, altos teores de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), entre outros. Assim, surge a necessidade de aplicar técnicas de tratamento eficientes visando enquadrar todos os parâmetros na legislação vigente (SANTOS, SEHNEM e FREITAS, 2015; ISARAIN-CHÁVEZ et al., 2014; KUPPUSAMY et al., 2017).

Assim, surgem os tratamentos eletroquímicos, como a eletrofloculação (EF) que têm sido estudada para diversos tipos de efluentes. A EF se caracteriza por ser um processo eletroquímico baseado na desestabilização dos poluentes com o uso de uma fonte de energia capaz de fornecer corrente elétrica a um eletrodo de sacrifício para a geração do coagulante *in situ*.

No processo quando uma voltagem é aplicada, o ânodo é oxidado e o cátodo reduzido, desta forma ocorre a formação eletroquímica do agente coagulante. O material de carga positiva pode reagir com os de cargas negativas presentes no efluente, ocorrendo a hidrólise da solução e a liberação do hidróxido, considerado um dos responsáveis pelo tratamento. Ao mesmo tempo, em decorrência do potencial aplicado, ocorre a formação de microbolhas de hidrogênio no cátodo do reator, por meio das

Realização

ABES-RS



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br  
abes-rs@abes-rs.org.br  
(51) 3212.1375



11º SIMPÓSIO  
INTERNACIONAL  
DE QUALIDADE  
AMBIENTAL

02 A 04 DE  
OUTUBRO  
PORTO ALEGRE-RS  
TEATRO DA PUCRS



TEMA  
meio ambiente,  
política & economia

reações de redução. Tais microbolhas são responsáveis pela separação das partículas. Então, toda a matéria em suspensão é eletroflotada, provocando o clareamento do efluente tratado. Na superfície, forma-se uma camada de espuma que contém as partículas flotas que são facilmente removidas (COMBATT et al., 2017; BRITO et al., 2012).

Desta forma, o objetivo geral deste trabalho é otimizar estatisticamente a corrente elétrica, tempo de tratamento e a distância entre os eletrodos da eletrofloculação com uso de eletrodo de alumínio aplicada ao efluente de curtume.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos procedimentos experimentais, utilizou-se a infraestrutura do Laboratório de Águas e Ecotoxicologia da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) *campus* Cerro Largo/RS.

### 2.1 Efluente

O efluente utilizado nesta pesquisa foi fornecido por uma indústria de curtume, localizada no município de Portão no Rio Grande do Sul. O curtume tem uma produção diária de 40 toneladas usando matéria prima bovina e ovina para a produção do couro *Wet-blue*. O efluente de curtume sem tratamento, denominado efluente bruto foi coletado no tanque de equalização da estação de tratamento da indústria, antes do tratamento físico-químico. O efluente foi armazenado em uma bombona de polietileno, sob temperatura ambiente de aproximadamente 25 °C.

### 2.2 Procedimento experimental

O reator de EF (batelada) foi constituído por uma fonte de alimentação da marca *Laboratory Power Supply*, modelo EA-PS3016-20B com uma capacidade de corrente de até 20 A, um béquer com capacidade de 2 L de efluente, um par de eletrodos de Al, e um agitador magnético da marca IKA, modelo C-MAG HS7. Para os ensaios de EF foram utilizados 2 eletrodos de Al, com dimensões 5 x 10 cm, com área imersa no efluente de 25cm<sup>2</sup> para cada eletrodo, dispostos paralelamente e isolados eletricamente com borracha sintética, variando-se a distância entre eles.

O volume de efluente para tratamento foi fixado em 500 mL, com agitação de 4 rotações por minuto (rpm). A condutividade do efluente de curtume foi ajustada por meio da adição de cloreto de sódio (NaCl – marca *Alphatec*). Fixou-se um tempo de estabilização para coleta e análise da solução eletrofloculada em 1 h. Analisou-se os parâmetros DQO, turbidez e cor aparente em cada ensaio.

### 2.3 Planejamento experimental

Para determinar os valores ótimos dos parâmetros operacionais do reator de EF, aplicou-se um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) (ROGRIGUES; LEMMA, 2009). Foram investigados os parâmetros independentes: corrente elétrica (*i*), tempo de tratamento (*t*) e distância entre os eletrodos, representados pelos valores codificados  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ , respectivamente.

No DCCR, realizou-se um planejamento fatorial completo 2<sup>3</sup>, incluindo 6 ensaios nos pontos axiais e 3 ensaios no ponto central, totalizando 17 ensaios. Para a determinação da influência dos parâmetros operacionais, corrente elétrica, tempo de tratamento e distância entre os eletrodos, investigou-se a eficiência na remoção de cor aparente, turbidez e DQO.

Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br  
abes-rs@abes-rs.org.br  
(51) 3212.1375



## 2.4 Caracterização do efluente

A metodologia utilizada para realização das análises de caracterização do efluente de curtume quanto aos parâmetros físicos e químicos está de acordo com os procedimentos descritos no *Standard Methods for Examination of Water & Wastewater* (APHA, 2005). Realizou-se a caracterização inicial do efluente bruto e posteriormente a caracterização do efluente tratado nas condições otimizadas. Todas as análises foram realizadas em duplicata.

## 2.5 Análise estatística

A análise estatística foi realizada por meio do software Microsoft Excel 2013 e do programa Statistica® 7 que permitiu a tabulação dos dados, realização da análise de variância (ANOVA) e a representação gráfica dos resultados, com obtenção da superfície de resposta e perfil de contorno. Aos resultados dos parâmetros físico-químicos, foi aplicado o método desejabilidade global, função do programa Statistica® 7 e o processo foi otimizado na melhor condição de ajustes das variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ .

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Caracterização do efluente de curtume bruto

Previamente a aplicação do processo de tratamento de EF efetuou-se a caracterização físico-química do efluente de curtume bruto. Os resultados foram comparados com as Resoluções N°357/2005 e N°430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e Resolução N° 355/2017 do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA). Na Tabela 6, pode-se observar os resultados obtidos e verificar que os parâmetros turbidez, OD, cor aparente, SSed e TOG estão fora dos padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357/2005 e N°430/2011. O TOG e a quantidade de SSed estão ainda em desacordo com a Resolução CONSEMA N° 355/2017. Os resultados estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1- Caracterização do efluente bruto

Parâmetros	Efluente bruto	Parâmetros	Efluente bruto
pH	7,69±0,02	STF (mg L <sup>-1</sup> )	22.885,00±95,00
CE (mS cm <sup>-1</sup> )	23,84±0,14	STV (mg L <sup>-1</sup> )	6.075,00±65,00
Cor aparente (u.C)	8.670,00±52,50	SST (mg L <sup>-1</sup> )	925,00±55,00
Turbidez (NTU)	396,00±2,00	SSF (mg L <sup>-1</sup> )	625,00±25,00
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	3.059,14±61,17	SSV (mg L <sup>-1</sup> )	300,00±20,00
OD (mg L <sup>-1</sup> )	0,35±0,05	SDT (mg L <sup>-1</sup> )	28.035,00±185,00
TOG (mg L <sup>-1</sup> )	243,30±10,00	SDF (mg L <sup>-1</sup> )	22.260,00±120,00
SSed (mg L <sup>-1</sup> )	18,00±1,00	SDV (mg L <sup>-1</sup> )	5.775,00±65,00
ST (mg L <sup>-1</sup> )	28.960,00±260		

Nota: Condutividade elétrica (CE), Demanda química de oxigênio (DQO), Oxigênio dissolvido (OD), Teor de óleos e graxas (TOG), Sólidos sedimentáveis (SSed), sólidos totais (ST), Sólidos totais fixos (STF), sólidos totais voláteis (STV), sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF), sólidos suspensos voláteis (SSV), sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos dissolvidos fixos (SDF) e sólidos dissolvidos voláteis (SDV).

Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br  
abes-rs@abes-rs.org.br  
(51) 3212.1375



A caracterização do efluente bruto mostrou que vários parâmetros físico e químicos estavam em desacordo com os valores máximos permissíveis, estipulados pelas Resoluções CONAMA N° 357/2005, N°430/2011 (turbidez, OD, cor aparente, SSed e TOG) e CONSEMA N° 355/2017 (DQO, TOG e SSed). Assim torna-se necessário a aplicação de um tratamento eficiente, capaz de eliminar grande parte dos contaminantes, enquadrando os parâmetros na legislação e tornando a disposição final ambientalmente adequada possível.

### 3.2 Aplicação da eletrofloculação

Para adequação dos parâmetros físicos em químicos em relação as Resoluções CONAMA N° 357/2005, N°430/2011 e CONSEMA N° 355/2017, a tecnologia de EF foi aplicada no tratamento do efluente de curtume.

#### *Eficiência na remoção da cor aparente, turbidez e DQO*

Para verificar a eficiência do processo de tratamento da EF calculou-se as porcentagens de remoção de cada variável dependente de estudo (cor aparente, turbidez e DQO) em cada ensaio da matriz. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2- Resultados da remoção média (%) dos parâmetros analisados após a EF

Ensaio	Variáveis Codificadas			Variáveis Independentes			Variáveis Dependentes		
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	i (A)	t (min)	d (cm)	% Remoção cor aparente	% Remoção turbidez	% Remoção DQO
1	-1	-1	-1	4	15	2,5	96,00±0,33	86,99±0,41	74,00±1,25
2	1	-1	-1	6	15	2,5	83,36±0,23	54,17±0,49	71,50±3,75
3	-1	1	-1	4	45	2,5	92,35±0,03	66,67±0,84	76,50±4,69
4	1	1	-1	6	45	2,5	96,59±0,30	95,67±0,25	67,00±1,64
5	-1	-1	1	4	15	5,5	96,51±0,32	90,78±0,40	67,00±1,64
6	1	-1	1	6	15	5,5	87,62±0,59	58,33±0,35	76,00±3,21
7	-1	1	1	4	45	5,5	97,22±1,41	91,35±0,52	53,00±0,51
8	1	1	1	6	45	5,5	98,18±0,31	94,19±0,26	58,74±6,76
9	1,68	0	0	3,32	30	4	96,28±0,32	87,75±0,15	73,50±1,75
10	1,68	0	0	6,68	30	4	98,86±0,31	95,64±0,25	66,50±2,13
11	0	-1,68	0	5	4,8	4	95,60±0,34	88,38±0,53	64,50±1,84
12	0	1,68	0	5	55,2	4	98,14±0,31	85,98±0,16	66,50±0,83
13	0	0	-1,68	5	30	1,48	91,86±1,27	64,52±0,21	70,00±1,29
14	0	0	1,68	5	30	6,52	93,64±0,24	72,10±0,19	83,99±3,13
15	0	0	0	5	30	4	95,11±0,32	73,61±0,69	73,00±3,24
16	0	0	0	5	30	4	94,93±0,25	72,85±0,31	72,00±5,23
17	0	0	0	5	30	4	89,57±0,94	69,32±0,05	74,50±13,6

Nota: Corrente (i), Tempo (t) e Distância (d).

Na análise simultânea dos resultados expressos na Tabela 2, nota-se que as melhores eficiências de remoção dos parâmetros dependentes, ocorreram no ensaio 4 (i = 6 A, t = 45 min e d =



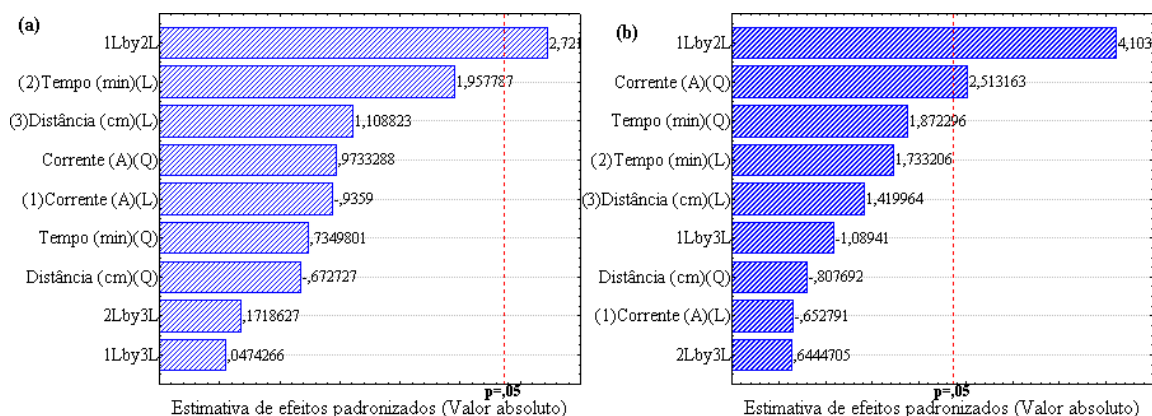
2,5 cm) obtendo uma remoção de 67 % para a variável DQO e valores superiores a 95 % para a cor aparente e turbidez.

### Otimização do processo de eletrofloculação

Para validação do tratamento proposto a partir dos resultados encontrados realizou-se a ANOVA pelo modelo previsto para remoção da cor aparente, turbidez e DQO.

Inicialmente foram analisados os efeitos da corrente elétrica, tempo de tratamento e distância entre os eletrodos por meio do gráfico de Pareto para as variáveis cor aparente e turbidez.

Figura 1 – Gráfico de Pareto para (a) Cor aparente e (b) Turbidez



Analisando a Figura 1(a) que avalia o nível de significância para a variável cor aparente nota-se que apenas a interação entre os termos lineares corrente e tempo apresentou um nível de significância de 95 % ( $p \geq 0,5$ ). Os outros parâmetros e interações apresentaram valores inferiores a 95 % ( $p \leq 0,5$ ) mostrando que não influenciam significativamente as variáveis dependentes. A Figura 1(b) avalia o nível de significância para a variável turbidez e apresenta a interação linear significativa entre a corrente elétrica e o tempo de tratamento e a variável corrente em termos quadráticos como parâmetros significativos a um nível de 95 % ( $p \geq 0,5$ ) enquanto os demais parâmetros e interações não apresentaram significância.

Em seguida, a ANOVA foi realizada considerando todas as interações e os resultados podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3 - ANOVA do modelo previsto para a redução da cor aparente e turbidez pelo tratamento de EF a um nível de 95 % de significância ( $p \leq 0,5$ )

Parâmetro	Modelo quadrático	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Fcal/Fest	p-valor
Cor aparente	Regressão	269,88	7	38,55	4,38/3,29	0,0219
	Resíduos	79,14	9	8,79		
	Total	349,02	16			
Turbidez	Regressão	3437,92	7	491,13	7,336/3,292	0,004002
	Resíduos	602,53	9	66,95		
	Total	4040,45	16			

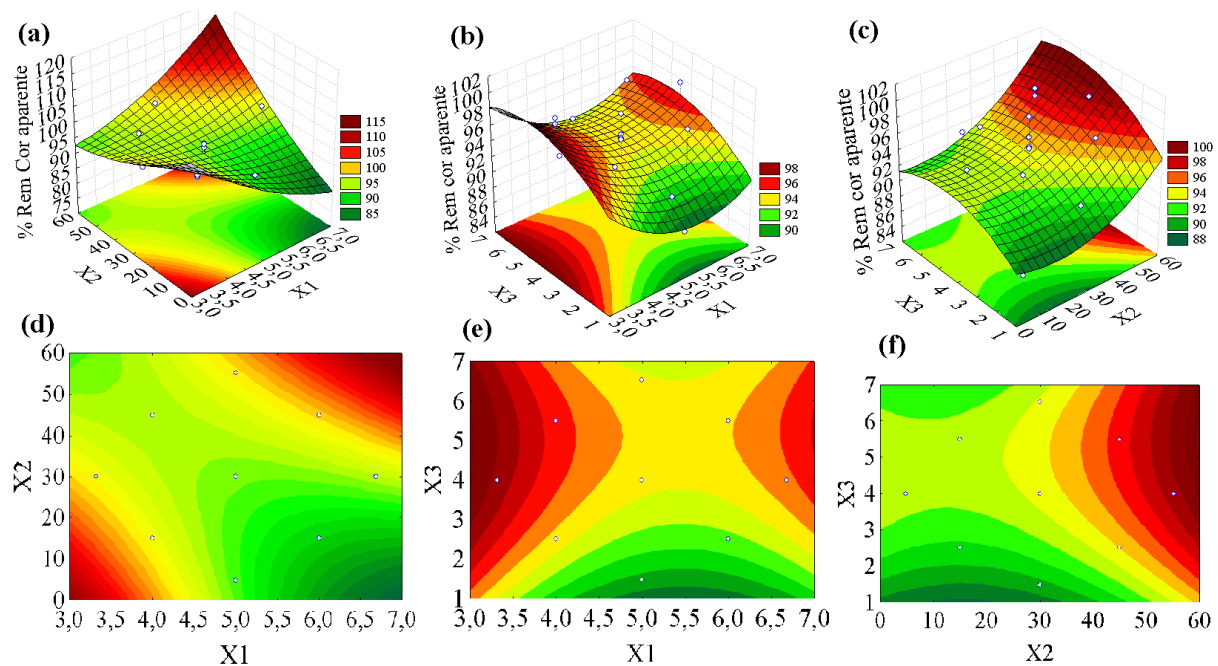
Nota: Fcal = Valor de F calculado; Fest = Valor de F estatístico



Analisando os p-valor da Tabela 3 para as variáveis cor aparente e turbidez pode-se dizer que as variáveis independentes  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  mostraram-se estatisticamente significativas a um nível de 95 % visto que  $p\text{-valor} < 0,05$ . Além disso, os valores do F calculado foram maiores do que o F tabelado confirmando que o modelo proposto é válido. Desse modo, as superfícies de resposta e perfis de contorno foram geradas.

Nas Figuras 2 e 3, é possível observar as superfícies resposta exibindo a porcentagem de remoção das variáveis dependente em função das variáveis independentes  $X_1$ (A),  $X_2$ (min) e  $X_3$ (cm) e o perfil de contorno.

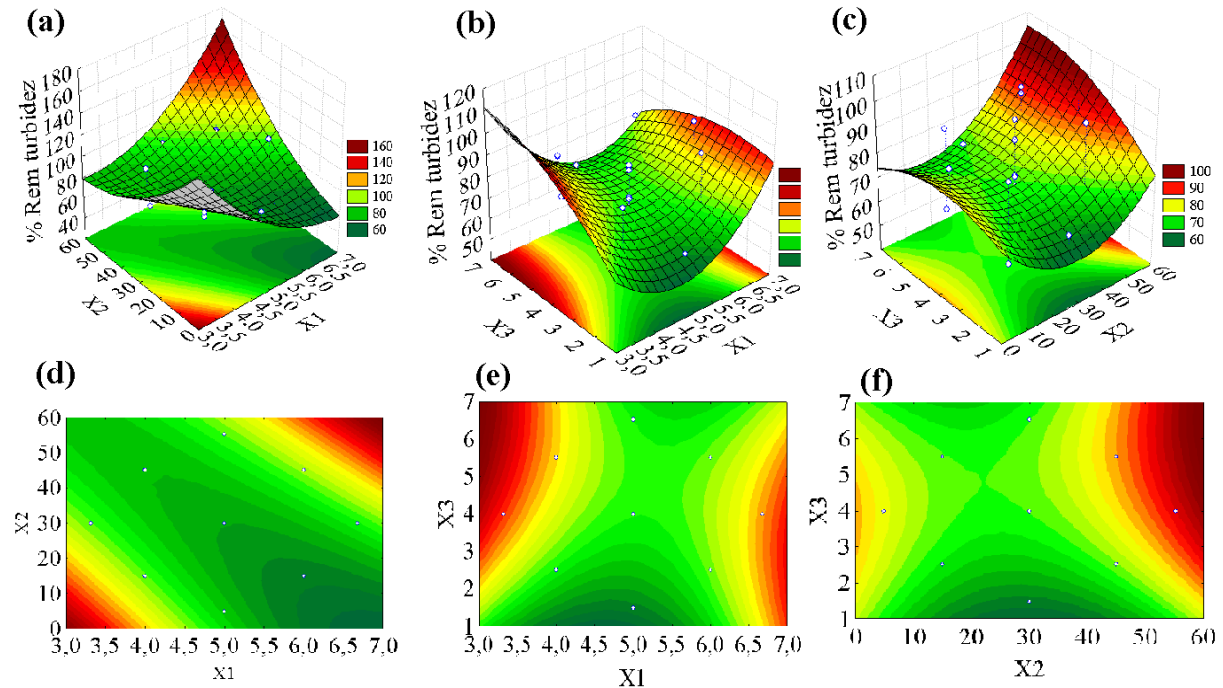
Figura 2- Superfície de resposta e perfil de contorno em relação à redução da variável dependente cor aparente



Nota: (a) Superfície de resposta da interação entre  $X_1$  e  $X_2$  (b) Superfície de resposta da interação entre  $X_1$  e  $X_3$  (c) Superfície de resposta da interação entre  $X_2$  e  $X_3$  (d) Perfil de contorno da interação entre  $X_1$  e  $X_2$  (e) Perfil de contorno da interação entre  $X_1$  e  $X_3$  e (f) Perfil de contorno da interação entre  $X_2$  e  $X_3$ .

Observando as Figura 2(a) e 2(d) nota-se que valores mais baixos ( $X_1 < 4$  A e  $X_2 < 20$  min) apresentam melhores remoções de cor aparente, o que corrobora com as vantagens já descritas na utilização da EF, visto que trarão menores gastos com o consumo de energia elétrica. As Figuras 2(b) e 2(e) mostra que valores de  $X_1 < 4$  A e considerando do menor ao maior valor de  $X_3$  são encontrados ótimos resultados de remoção. Enquanto as Figuras 2(c) e 2(f) que relacionam  $X_2$  e  $X_3$  mostram que para  $X_3 > 2$  cm os melhores resultados serão observados com  $X_2 > 50$  min.

Figura 3 - Superfície de resposta e perfil de contorno em relação à redução da variável dependente turbidez

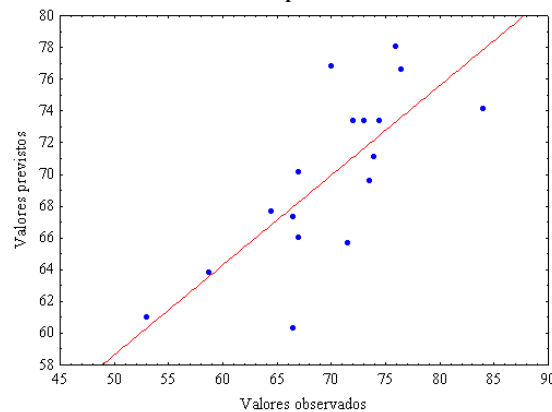


Nota: (a) Superfície de resposta da interação entre  $X_1$  e  $X_2$  (b) Superfície de resposta da interação entre  $X_1$  e  $X_3$  (c) Superfície de resposta da interação entre  $X_2$  e  $X_3$  (d) Perfil de contorno da interação entre  $X_1$  e  $X_2$  (e) Perfil de contorno da interação entre  $X_1$  e  $X_3$  e (f) Perfil de contorno da interação entre  $X_2$  e  $X_3$ .

A Figura 3 relaciona as variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  quanto a remoção de turbidez do efluente de curtume. Nas Figuras 3(a) e 3(d) ótimos resultados são visualizados quando  $X_1 < 4$  A e  $X_2 < 20$  min e quando  $X_1 > 6,5$ A e  $X_2 > 50$ min. Enquanto nas Figuras 3(b) e 3(e) valores de  $X_1 < 3,5$  A e  $X_3 > 4$  cm apresentam remoções próximas a 100 %, assim como na Figura 3(c) e 3(f) valores em que  $X_3 > 4$  A e  $X_2 > 50$  min.

Posteriormente, para a análise da variável DQO avaliou-se o gráfico dos valores previstos *versus* valores observados (Figura 4) visando comprovar a distribuição normal dos valores em torno da reta.

Figura 4 - Gráfico dos valores previstos x valores observados

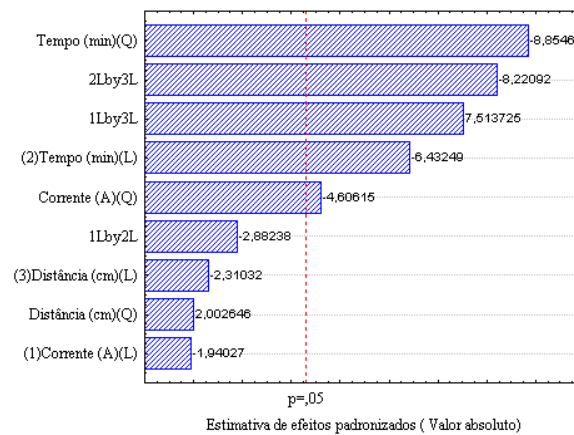




Nota-se na Figura 4 que a maioria dos valores estão distribuídos normalmente ao longo de uma reta. Desta forma não há problemas graves com a normalidade dos dados (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2011).

O gráfico de Pareto para a variável DQO pode ser visualizado na Figura 5, onde nota-se que as variáveis t (min) e i (A) nos termos quadráticos tiveram influência negativa para a variável dependente DQO, assim como o t (min) em termos lineares e a interação linear entre o t (min) e a d (cm). A interação linear entre a i (A) e a d (cm) influenciou positivamente na porcentagem de remoção de DQO.

Figura 5 - Gráfico de Pareto para a variável DQO



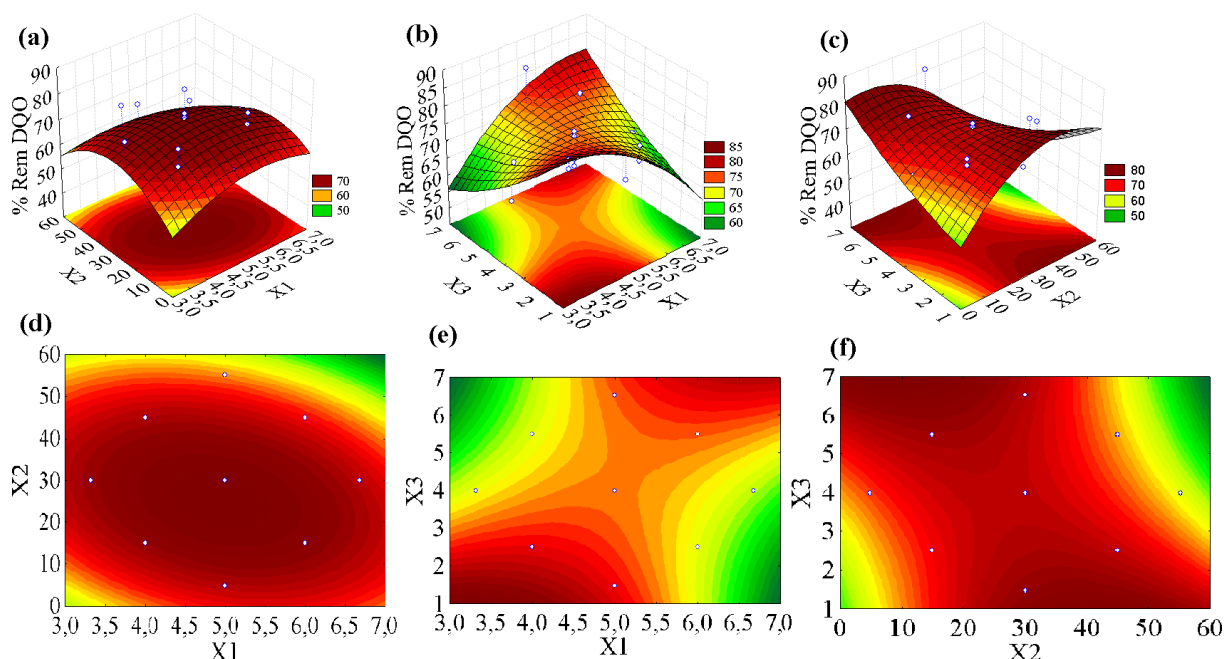
A ANOVA da variável DQO (Tabela 4) foi realizada com as variáveis significativas supracitadas. O *pure error* (erro puro) que mostra a existência de uma variação aleatória em torno da reta e o *lack of fit* (falta de ajuste) foram considerados e os efeitos foram ignorados (AMADOR, 2011).

Tabela 4 - do modelo previsto para a redução da DQO pelo tratamento de EF a um nível de 95 % de significância ( $p \leq 0,5$ )

Parâmetro	Modelo quadrático	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Fcal/Fest	p-valor
DQO	Regressão	826,0292614	5	165,21	4,6279/3,2039	0,0161
	Resíduos	392,6741671	11	35,6976516		
	Falta de ajuste	389,5086	9			
	Erro puro	3,1655	2			
	Total	1611,377595	16			

Observa-se na Tabela 4, que o modelo proposto é válido visto que o F calculado é maior que o F tabelado e o p valor é  $< 0,05$ , validando o modelo a um nível de 95 % de significância. Posteriormente, os gráficos de superfície resposta e perfis de contorno puderam ser gerados.

Figura 6 - Superfície de resposta e perfil de contorno em relação a redução da variável DQO



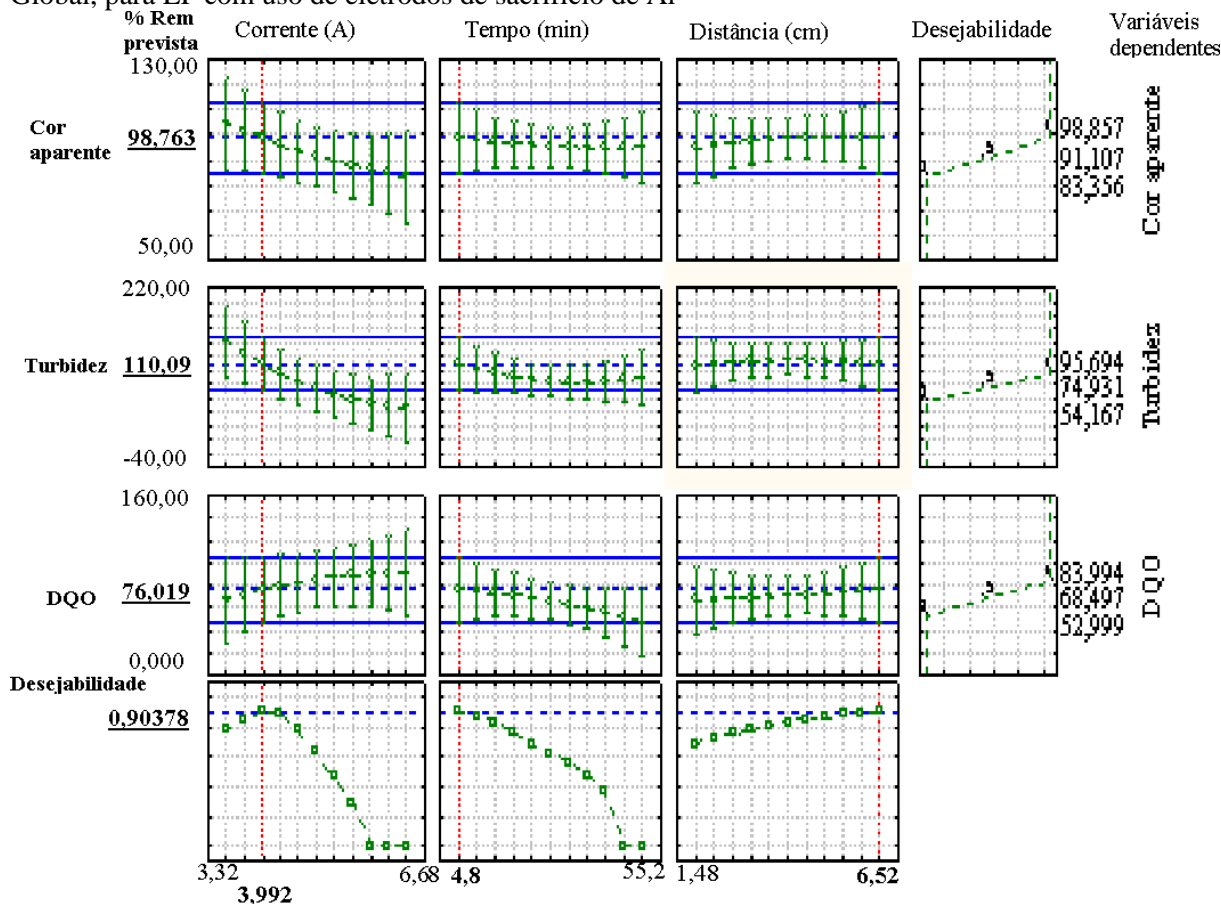
Nota: (a) Superfície de resposta da interação entre  $X_1$  e  $X_2$  (b) Superfície de resposta da interação entre  $X_1$  e  $X_3$  (c) Superfície de resposta da interação entre  $X_2$  e  $X_3$  (d) Perfil de contorno da interação entre  $X_1$  e  $X_2$  (e) Perfil de contorno da interação entre  $X_1$  e  $X_3$  e (f) Perfil de contorno da interação entre  $X_2$  e  $X_3$ .

Na Figura 6 apresenta-se a eficiência na remoção da DQO considerando as variáveis independentes. Nas condições apresentadas na Figura 6(a) e 6(d) a remoção pode chegar a 70 % são observadas numa ampla faixa de  $X_1$  e  $X_2$ , sendo que  $X_1$  varia de 3 A a 7 A e  $X_2$  de 5 min a 45 min. Valores de  $X_1 < 4,5$  A e  $X_3 < 3$  A apresenta remoções próximas a 80 %. Para valores de  $X_2 < 20$  min,  $X_3$  deve ser maior do que 5 centímetros para se obter remoções de 80 %, enquanto para valores de  $25 \text{ min} < X_2 < 40$  min toda a faixa de  $X_3$  pode obter essa remoção, já para valores de  $X_2 > 40$  min,  $X_3$  deve ser menor do que 3 centímetros.

Com a confirmação que o modelo proposto é válido, através das análises estatísticas foi possível aplicar a função desejabilidade global do software Statistica® 7 afim de obter de forma simultânea as condições ótimas das variáveis independentes (tempo de tratamento, corrente elétrica e distância entre os eletrodos) para melhor eficiência da EF quanto a remoção dos parâmetros dependentes (cor aparente, turbidez e DQO).

O tracejado em vermelho da Figura 4 representa os valores ótimos das variáveis independentes consideradas neste estudo, para o tratamento de efluente de curtume por EF com uso de eletrodo de Al. A faixa em azul, corresponde a eficiência prevista de remoção para cada um dos parâmetros, nas condições otimizadas.

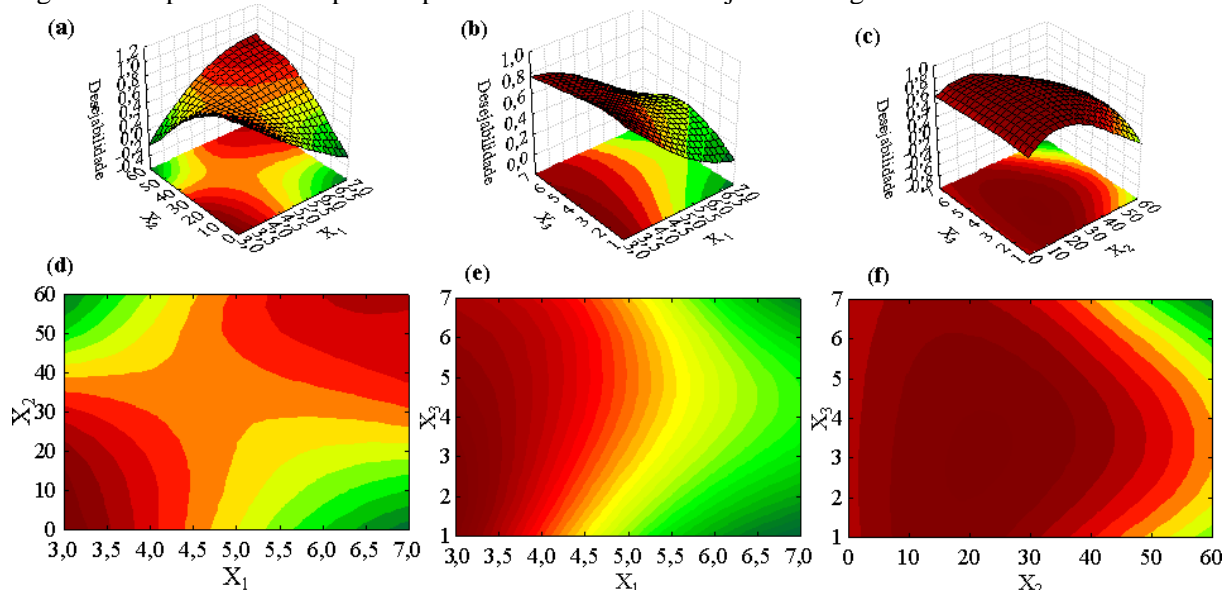
Figura 7 - Otimização simultânea das variáveis dependentes por meio da função Desejabilidade Global, para EF com uso de eletrodos de sacrifício de Al



Os valores otimizados das variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  corresponderam a: 3,99 A, 4,8 min e 6,52 cm. As porcentagens de remoção previstas pelo modelo para cada variável dependente foram 98,76 % para cor aparente, 100 % para a turbidez e de 76,01 % para a DQO.

O valor da desejabilidade global varia de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1 melhor é o modelo proposto e mais próximos serão os resultados pretendidos dos obtidos. Neste estudo, a função desejabilidade global obtida foi de 0,90, indicando assim uma ótima resposta.

Figura 8 - Superfície de resposta e perfil de contorno da desejabilidade global



Nota: (a) Superfície de resposta da interação entre  $X_1$  e  $X_2$  (b) Superfície de resposta da interação entre  $X_1$  e  $X_3$  (c) Superfície de resposta da interação entre  $X_2$  e  $X_3$  (d) Perfil de contorno da interação entre  $X_1$  e  $X_2$  (e) Perfil de contorno da interação entre  $X_1$  e  $X_3$  e (f) Perfil de contorno da interação entre  $X_2$  e  $X_3$ .

Observando a Figura 8, nota-se que as melhores condições de remoção são encontradas para valores de  $X_1 < 4$  A e  $X_2 < 30$  min. Considerando a corrente ( $X_1$ ) e a distância ( $X_3$ ) condições ótimas são encontradas para valores de  $X_1 < 4$  A e na ampla faixa de  $X_3$  ( $1 < X_3 < 7$ ). Na interação entre  $X_2$  e  $X_3$  as condições ótimas estão para  $X_2 < 40$  min e  $1 < X_3 < 7$ .

### 3.3 Validação do modelo proposto

Após a obtenção dos resultados da função desejabilidade global realizou-se um novo teste de EF com uso dos eletrodos de sacrifício de Al, considerando os valores de otimização de  $X_1$  (3,99 A),  $X_2$  (4,8 min) e  $X_3$  (6,52 cm). Os resultados obtidos para as variáveis dependentes estão expressos na Tabela 5, sendo possível notar que os valores de remoção foram próximos aos previstos pelo modelo.

Tabela 5 – Resultados alcançados utilizando a otimização

Parâmetros	Efluente bruto	Otimizado	% Remoção Prevista	% Remoção Real
Cor aparente (uC)	8.670,00±52,50	506,00±8,00	98,76	94,20
Turbidez (UNT)	396,00±2,00	21,50±0,50	100,00	94,30
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	3059,14±61,17	795,30±45,90	76,02	74,00

A remoção real da cor aparente foi de 94,2 %, este valor está próximo do previsto. No entanto, o valor fica acima do padrão estabelecido pela legislação vigente. A diminuição deste parâmetro relaciona-se a remoção da matéria orgânica presente no efluente e melhora significativamente a estética do mesmo. A turbidez teve uma remoção de 94,3%, e indica elevada eficiência na EF visto que com o resultado obtido este parâmetro se enquadra no padrão estabelecido pelas Resoluções CONAMA N° 357/2005 e N°430/2011.



A porcentagem de remoção da DQO do efluente foi de 74 %, considerando ser um parâmetro de suma importância, pois o consumo de oxigênio é um dos problemas mais sérios do aumento da matéria orgânica provocando um desequilíbrio ecológico causando a extinção dos organismos aeróbicos, o resultado obtido foi satisfatório, no entanto tal parâmetro ficou acima do limite estabelecido pela Resolução CONSEMA N° 355/2017 (FUNASA, 2014). Fornari (2008) obteve remoções próximas a 80 % para a DQO com o uso de eletrodos de Al, no entanto o tempo de tratamento e a corrente elétrica eram elevadas, sendo a corrente elétrica de 5,5 A e o tempo de tratamento de 30 minutos, isto acarreta em um maior custo no tratamento relacionado ao maior consumo de energia elétrica.

Os parâmetros físico-químicos analisados na caracterização inicial do efluente de curtume bruto foram novamente analisados após a EF realizada nas condições otimizadas de tratamento. Os resultados estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Caracterização do efluente de curtume após a EF

Parâmetros	Efluente tratado em condições otimizadas
pH	8,32±0,20
CE (mScm <sup>-1</sup> )	35,25±1,50
OD (mg L <sup>-1</sup> )	7,80±0,30
TOG (mg L <sup>-1</sup> )	8,33±5,00
SSed (mg L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	0,10±0,00
ST (mg L <sup>-1</sup> )	17.995,00±1.705,00
STF (mg L <sup>-1</sup> )	14.460,00±80,00
STV (mg L <sup>-1</sup> )	3.535,00±85,00
SST (mg L <sup>-1</sup> )	350,00±50,00
SSF (mg L <sup>-1</sup> )	200,00±50,00
SSV (mg L <sup>-1</sup> )	150,00±100,00
SdT (mg L <sup>-1</sup> )	17.645,00±1.755,00
SdF (mg L <sup>-1</sup> )	14.260,00±130,00
SdV (mg L <sup>-1</sup> )	3.385,00±285,00

Nota: Condutividade elétrica (CE), Demanda química de oxigênio (DQO), Oxigênio dissolvido (OD), Teor de óleos e graxas (TOG), Sólidos sedimentáveis (SSed), sólidos totais (ST), Sólidos totais fixos (STF), sólidos totais voláteis (STV), sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF), sólidos suspensos voláteis (SSV), sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos dissolvidos fixos (SdF) e sólidos dissolvidos voláteis (SDV).

Os parâmetros pH, OD, TOG e SSed ficaram dentro dos padrões estabelecidos pelas Resoluções CONAMA N° 357/2005, N° 430/2011 e CONSEMA 355/2017. A série de sólidos apesar da eficiência ter apresentado valores próximos ou superiores a 50%, não se enquadraram nos valores estipulados pelas legislações supracitadas

#### 4. CONCLUSÃO

Foi possível realizar a caracterização físico-química do efluente advindo da indústria de curtume e constatar com base nos resultados obtidos que os parâmetros turbidez, OD, cor aparente,

Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br  
abes-rs@abes-rs.org.br  
(51) 3212.1375



11º SIMPÓSIO  
INTERNACIONAL  
DE QUALIDADE  
AMBIENTAL

02 A 04 DE  
OUTUBRO  
PORTO ALEGRE-RS  
TEATRO DA PUCRS



TEMA  
meio ambiente,  
política & economia

SSed e TOG estavam em desconformidades com as Resoluções CONAMA N°357/2005, N°430/2011 e CONSEMA N° 355/2017, necessitando de tratamento adequado para a correta disposição em corpo hídrico Classe II.

O planejamento experimental DCCR 2<sup>3</sup>, incluiu 6 ensaios nos pontos axiais e 3 ensaios no ponto central, totalizando 17 ensaios. A ANOVA, permitiu assegurar com 95% de significância que as variáveis independentes corrente elétrica ( $X_1$ ), tempo de tratamento ( $X_2$ ) e distância entre os eletrodos ( $X_3$ ), foram responsáveis por obter a máxima porcentagem de remoção das variáveis dependentes cor aparente, turbidez e DQO.

Na análise da função de desejabilidade global, superfícies de resposta e perfis de contorno identificou-se os valores ótimos de tratamento, sendo estes:  $X_1$  de 3,99 A,  $X_2$  de 4,8 min e  $X_3$  de 6,52 cm. Com a EF realizada nas condições otimizadas supracitadas foi possível obter uma redução para as variáveis dependentes, cor aparente, turbidez e DQO, de: 94,2 %, 94,3 % e 74 % respectivamente.

O uso do DCCR e as análises de: ANOVA, desejabilidade global e superfície de resposta, permitiu uma melhor compreensão da tecnologia de EF aplicada no tratamento de efluente de curtume com uso de eletrodos de sacrifício de Al, sendo possível considerar a aplicabilidade da tecnologia de EF como uma alternativa eficiente para o tratamento de efluente de curtume.

Por fim, apesar do tratamento de EF aplicado ao efluente de curtume apresentar elevada eficiência, recomenda-se um pós-tratamento com o objetivo de eliminar os contaminantes que não se enquadraram nas concentrações máximas de lançamento em corpo hídrico conforme descrito na legislação vigente.

## REFERÊNCIAS

AMADOR, J. P. et al. Análise das pressuposições e adequação dos resíduos em modelo de regressão linear para valores individuais, ponderados e não ponderados, utilizando procedimentos do SAS®. **Ciência e Natura**, v. 33, n. 2, p. 7, 2011.

APHA. American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21ª Ed. Washington – DC: APHA, 2005.

Brasil. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETA'S** /Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – Brasília: Funasa, 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n° 357, de 17 de março de 2006.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n° 430, de 13 de maio de 2011.

BRITO, J. F. et al. Tratamento da água de purificação do biodiesel utilizando eletrofloculação. **Quim. Nova**, v. 35, n. 4, p. 728-732, 2012.

COMBATT, M. P. M. et al. Validation of the electrocoagulation process and evaluation of the electro-dissolution of electrodes in the treatment of poultry slaughterhouse wastewater. **Química Nova**, v. 40, n. 4, p. 447-453, 2017.

FORNARI, M. M. T. et al. **Aplicação da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de curtume**. 2008.

Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br  
abes-rs@abes-rs.org.br  
(51) 3212.1375



11º SIMPÓSIO  
INTERNACIONAL  
DE QUALIDADE  
AMBIENTAL

02 A 04 DE  
OUTUBRO  
PORTO ALEGRE-RS  
TEATRO DA PUCRS



TEMA  
meio ambiente,  
política & economia

ISARAIN-CHÁVEZ, E. et al. Comparative study of electrochemical water treatment processes for a tannery wastewater effluent. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 713, p. 62-69, 2014.

KUPPUSAMY, S. et al. Decoloração eletroquímica e biodegradação de efluentes de curtumes para redução da demanda química de oxigênio e cromo hexavalente. **Journal of Water Process Engineering**, v. 20, p. 22-28, 2017.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, Ivanildo. **Água na indústria: uso racional e reuso**. Oficina de Textos, 2005.

MONTGOMERY, D. C; RUNGER, G. C; HUBELE, N. F. **Estatística aplicada à engenharia**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Livros Técnicos e Científicos, 2011.

RIO GRANDE DO SUL. Resolução CONSEMA nº 355, de 13 de julho de 2006.

RODRIGUES, M. I. LEMMA, A.R. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2. ed. Campinas, São Paulo: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009.

SANTOS, G.; SEHNEM, S.; SANTOS DE FREITAS, M. Avaliação do Nível de Sustentabilidade de um Curtume Gaúcho à Luz do Sistema de Gestão Ambiental (SGA). **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 4, n. 2, 2015.

Realização



Correalização



Informações:

qualidadeambiental.org.br  
abes-rs@abes-rs.org.br  
(51) 3212.1375