



11º SIMPÓSIO  
INTERNACIONAL  
DE QUALIDADE  
AMBIENTAL

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



TEMA  
meio ambiente,  
política & economia

## ELETRIFLOCUÇÃO APLICADA NO TRATAMENTO DE EFLUENTE LÁCTEO: DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E OTIMIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS RESPOSTAS

**Laura Behling** – laurabehling@live.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

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

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

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

**Resumo:** *Uma das principais preocupações da sociedade é a preservação dos recursos hídricos. As indústrias que utilizam elevado volume de água no processamento, como a indústria láctea, geram grande quantidade de efluente, o que torna necessário o desenvolvimento de técnicas de tratamento que associem baixo custo com alta eficiência. Nesse contexto, a eletrofloculação (EF) surge como uma alternativa aos processos de tratamento de efluentes. O objetivo desse trabalho consiste em aplicar a tecnologia de EF, utilizando Al como eletrodo de sacrifício, no tratamento do efluente de indústria de produtos lácteos, avaliando a eficiência na remoção de cor, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO) e absorvância  $\lambda - 254 \text{ nm}$ , e definir as condições ideais de tratamento. Foi utilizado como delineamento experimental, o DCCR 2<sup>3</sup>, composto por 17 ensaios. A análise de variância (ANOVA), os gráficos de superfície de resposta, contorno e a desejabilidade global serviram como base para determinação das condições otimizadas de tratamento. Os resultados demonstraram com 95 % de confiabilidade a significância das variáveis independentes pH, corrente elétrica e tempo de tratamento para obtenção da remoção das variáveis dependentes. As condições otimizadas determinadas por meio de análise estatística são pH inicial de 4,5, corrente 3,34 A e tempo de tratamento 55,2 min. As remoções obtidas nessas condições foram 72,95 % de DQO, 95,8 % de turbidez, 97,9 % de cor aparente e 71,5 % de absorvância  $\lambda - 254 \text{ nm}$ . O tratamento por EF mostrou-se eficiente no tratamento do efluente lácteo.*

**Palavras-chave:** *Efluente lácteo, Eletrofloculação, Eletrodo de alumínio, DCCR.*

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 APLICADA NO TRATAMENTO DE EFLUENTE LÁCTEO: PROJETO EXPERIMENTAL E OTIMIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS RESPOSTAS

**Abstract:** *One of the main concerns of society is the preservation of water resources. Industries that use high volumes of water in processing, such as the dairy industry, generate a large amount of effluent, which makes it necessary to develop treatment techniques that combine low cost with high efficiency. In this context, electroflocculation (EF) appears as an alternative to effluent treatment processes. The objective of this work is to apply EF technology, using Al as a sacrifice electrode, in the treatment of the effluent of the dairy industry, evaluating the efficiency in the removal of color, turbidity, chemical oxygen demand (COD) and absorbance  $\lambda - 254 \text{ nm}$ , and define optimal treatment conditions. The DCCR 2<sup>3</sup>, composed of 17 trials, was used as the experimental design. Analysis of variance (ANOVA), surface contour, contour and overall desirability graphs served as a basis for determination of optimized treatment conditions. The results showed with 95% confidence the significance of the independent variables pH, electric current and treatment time to obtain the removal of the dependent variables. The optimized conditions determined by means of statistical analysis are initial pH of 4,5, current 3,34 A and treatment time 55,2 min. The removals obtained under these conditions were 72,95% COD, 95,8% turbidity, 97,9% apparent color and 71,5% absorbance  $\lambda-254 \text{ nm}$ . Treatment by EF proved to be efficient in the treatment of milk effluent.*

**Keywords:** Dairy effluent, Electroflocculation, Aluminum electrode, DCCR.

### 1. INTRODUÇÃO

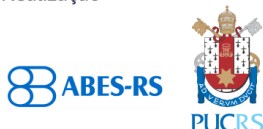
Uma das principais preocupações da sociedade atualmente é a preservação dos recursos hídricos tendo em vista a importância da água para a vida de todas as espécies do planeta. A contaminação dos corpos hídricos resultou no enrijecimento e aprimoramento da legislação ambiental no que tange a diretrizes e critérios para o lançamento de efluentes em águas superficiais, fato que tem preocupado, em especial, as indústrias que utilizam elevado volume de água no processamento da matéria-prima, a exemplo da indústria de alimentos.

A indústria láctea destaca-se no setor alimentício por ser um alimento do cotidiano e uma das maiores consumidoras de água, gerando grande quantidade de efluente, frequentemente caracterizado por elevada matéria orgânica. O efluente lácteo é considerado complexo por ter composição ampla e variável, possuir um alto teor de matéria orgânica, óleos, sais dissolvidos, nutrientes e sólidos. Parte desse efluente não pode ser reutilizado, podendo gerar danos ambientais se lançado no meio ambiente sem tratamento. Devido a essa complexidade e volume do efluente, faz-se necessário o desenvolvimento de técnicas de tratamento que associem baixo custo com alta eficiência (MELCHIORS et al., 2016; SARAIVA et al., 2009; ROGGENBACK, 2016).

Nesse contexto, o processo de eletrofloculação (EF) surgiu como uma alternativa aos processos de tratamento de efluentes. Este tratamento eletroquímico desestabiliza as moléculas do poluente do efluente através de uma diferença de potencial elétrico aplicado aos eletrodos de sacrifício, geralmente de ferro (Fe) ou alumínio (Al) e, como consequência, cátions são gerados pelo ânodo, reagindo com os colóides da solução tratada, flotando em forma de hidróxidos (STRATE, 2014).

Este estudo consiste na aplicação do delineamento experimental na otimização de múltiplas respostas resultantes do tratamento de efluente de uma indústria de produtos lácteos por EF, utilizando Al como eletrodo de sacrifício, além da realização da caracterização físico-química do efluente bruto e tratado.

Realização



Correalização



Informações:

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

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

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

### 2.1. Efluente

O efluente bruto, sem tratamento, foi coletado no tanque de equalização da estação de tratamento da indústria de produtos lácteos localizada no Rio Grande do Sul, no ano de 2017 e armazenado em bombona de polietileno.

### 2.2. Módulo experimental

Para o processo de EF, utilizou-se um reator eletroquímico (batelada) em escala laboratorial composto por uma fonte de alimentação de energia elétrica (marca: *Laboratory Power Supply*/modelo EA-PS 3016-20 B), um béquer com capacidade para 1 L de efluente, agitador magnético (marca: IKA/modelo C-MAG HS 7 S32) e um par de eletrodos de Al com dimensões de 10x05 cm.

### 2.3. Procedimento experimental

Durante o procedimento foram utilizados dois eletrodos de sacrifício de Al, isolados eletricamente por borracha sintética a uma distância de 1 cm, com uma área ativa (submersa) de 25 cm<sup>2</sup> em cada eletrodo. O volume de efluente estabelecido para tratamento foi 500 mL a uma agitação de 4 RPM, escolhida a partir de testes preliminares, e sob temperatura ambiente de 25±3 °C. A condutividade do efluente foi ajustada por meio da adição de NaCl (marca: *ALPHATEC*). Ao fim do processo, o tempo de estabilização adotado, para posterior coleta e análise do efluente eletrofloculado, foi fixado em 20 min.

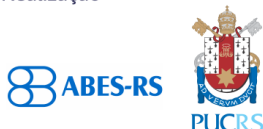
### 2.4. Planejamento experimental

Para o planejamento experimental desse estudo utilizou-se o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) (RODRIGUES & LEMMA, 2009). Foram trabalhadas três variáveis independentes: corrente elétrica (*i*), pH inicial e o tempo de tratamento (*t*). Realizou-se um planejamento fatorial completo 2<sup>3</sup>, incluindo 6 pontos axiais e 3 repetições nos pontos centrais, totalizando 17 ensaios. A eficiência da EF foi baseada na remoção de cor (u.C.), turbidez (UNT), DQO (mg L<sup>-1</sup>) e absorvância λ-254 nm. Na Tabela 1 estão expressos os valores codificados das variáveis independentes. Ressalta-se que os valores das variáveis independentes foram definidos a partir de testes preliminares com o efluente de indústria de lácteos.

Tabela 1 - Níveis estudados para as variáveis independentes da matriz

Variáveis independentes	Códigos	-1,68	-1	0	1	1,68
pH	X <sub>1</sub>	3,50	4,50	6,00	7,50	8,50
<i>i</i> (A)	X <sub>2</sub>	0,32	1,00	2,00	3,00	3,68
<i>t</i> (min)	X <sub>3</sub>	9,80	15,00	30,00	45,00	55,20

Realização



Correalização



Informações:

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



A influência dos parâmetros independentes,  $i$  (A), pH inicial e  $t$  (min), foi determinada a partir da eficiência de remoção dos parâmetros respostas ou dependentes: cor, turbidez, DQO e absorvância  $\lambda$ - 254 nm.

## 2.5. Caracterização do efluente

Realizou-se a caracterização inicial do efluente bruto por meio da análise dos parâmetros físico-químicos: cor, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), absorvância  $\lambda$  - 254 nm, sólidos totais, sólidos totais fixos, sólidos totais voláteis, sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos, sólidos suspensos fixos, sólidos suspensos voláteis, sólidos dissolvidos, sólidos dissolvidos fixos, sólidos dissolvidos voláteis, óleos e graxas, oxigênio dissolvido (OD), potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade.

A metodologia utilizada está de acordo com os procedimentos descritos no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). Ressalta-se que todos os parâmetros foram novamente analisados após a EF utilizando as condições de tempo de tratamento, corrente elétrica e pH otimizadas.

## 2.6. Análise estatística

Para verificar se o modelo proposto é estatisticamente significativo para um nível de confiança de 95% ( $p$ -valor  $<0.05$ ), os resultados experimentais foram submetidos ao software Statistica® 11 e a análise de variância ANOVA.

O método de desejabilidade global foi aplicado aos resultados dos parâmetros físico-químicos e a tecnologia de EF foi otimizada na melhor condição de ajustes das variáveis independentes.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

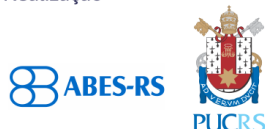
### 3.1. Caracterização do efluente

Na Tabela 2, observa-se a caracterização físico-química do efluente bruto proveniente de indústria de lácneos.

Tabela 2 - Caracterização físico-química do efluente bruto.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
DBO ( $\text{mg L}^{-1}$ )	430,00 $\pm$ 0,00	SSed ( $\text{mg L}^{-1} \text{h}^{-1}$ )	0,00
DQO ( $\text{mg L}^{-1}$ )	7.462,92 $\pm$ 86,49	ST ( $\text{mg L}^{-1}$ )	10.685,00 $\pm$ 1.067,00
Cor (u.C)	14.350,00 $\pm$ 353,00	STF ( $\text{mg L}^{-1}$ )	3.400,00 $\pm$ 98,00
Turbidez (UNT)	1.640,00 $\pm$ 14,14	STV ( $\text{mg L}^{-1}$ )	7.285,00 $\pm$ 968,00
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	25,00 $\pm$ 2,00	SST ( $\text{mg L}^{-1}$ )	2.000,00 $\pm$ 424,00
Condutividade ( $\text{uS cm}^{-2}$ )	8,90 $\pm$ 0,01	SSF ( $\text{mg L}^{-1}$ )	250,00 $\pm$ 140,00
Absorvância $\lambda$ - 254 nm (u.a.)	4,52 $\pm$ 0,03	SSV ( $\text{mg L}^{-1}$ )	1.750,00 $\pm$ 565,00
pH	12,74 $\pm$ 0,03	SDT ( $\text{mg L}^{-1}$ )	8.685,00 $\pm$ 643,00
OD ( $\text{mg L}^{-1}\text{O}_2$ )	0,76 $\pm$ 0,07	SDF ( $\text{mg L}^{-1}$ )	3.150,00 $\pm$ 42,00
Óleos e graxas ( $\text{mg L}^{-1}$ )	880,00 $\pm$ 197,00	SDV ( $\text{mg L}^{-1}$ )	5.535,00 $\pm$ 403,00

Realização



Correalização



Informações:

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



Comparando os valores obtidos com as resoluções do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) N° 128 e do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) N° 357 e N° 430, pode-se observar que o efluente possui parâmetros em desconformidade com os padrões para lançamento dos efluentes, tais como DBO, DQO, turbidez, óleos e graxas, OD, pH, sólidos suspensos e cor, demonstrando a necessidade um tratamento antes do lançamento em um corpo hídrico receptor, de forma a atender as exigências ambientais.

O índice de biodegradabilidade é de 15,37. Conforme Von Sperling (2005), para valores da relação entre DQO/DBO acima de 3,5 aponta-se a necessidade de um tratamento físico-químico, visto que há uma grande quantidade de matéria inerte no efluente, não sendo adequado o tratamento biológico. O valor obtido para o índice de biodegradabilidade justifica esse estudo.

### 3.2. Aplicação da EF para o tratamento do efluente de indústria de laticínios

#### *Eficiência na remoção de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância $\lambda$ -254 nm*

Tendo como objetivo a verificação da eficiência do tratamento de EF com uso de eletrodos de sacrifício de Al aplicado no efluente de produtos lácteos, a porcentagem média de remoção para as variáveis dependentes DQO, turbidez, cor aparente e absorvância  $\lambda$ - 254 nm foi calculada para cada ensaio proposto. A matriz do delineamento experimental e os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 3.

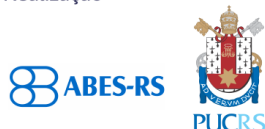
Tabela 3 - Resultado da remoção média (%) dos parâmetros analisados após a EF

Ens.	Variáveis codificadas			Variáveis independentes			Variáveis dependentes (% de remoção)			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	pH	I (A)	T (min)	Turb.	Cor Ap.	Abs;	DQO
1	-1	-1	-1	4,5	1	15	70,21±0,04	34,7±0,49	3,18±0,42	53,40±3,40
2	1	-1	-1	7,5	1	15	93,47±0,07	94,8±0,09	38,78±0,21	48,76±5,22
3	-1	1	-1	4,5	3	15	97,47±0,00	97,86±0,01	62,92±0,12	57,42±9,08
4	1	1	-1	7,5	3	15	98,69±0,04	97,96±0,02	56,64±0,05	56,15±7,53
5	-1	-1	1	4,5	1	45	92,96±0,04	98,82±0,01	65,02±0,08	72,68±2,27
6	1	-1	1	7,5	1	45	82,65±0,04	96,73±0,01	41,13±0,08	56,62±10,22
7	-1	1	1	4,5	3	45	93,66±0,08	99,36±0,01	75,00±0,03	73,35±3,58
8	1	1	1	7,5	3	45	98,54±0,00	98,57±0,01	60,51±0,05	69,06±0,56
9	-1,68	0	0	3,5	2	30	93,02±0,04	99,3±0,01	77,45±0,09	73,48±7,88
10	1,68	0	0	8,5	2	30	96,55±0,00	97,01±0,01	44,95±0,11	64,65±0,00
11	0	-1,68	0	6	0,32	30	52,38±0,86	0,00±0,00	3,60±0,78	40,15±0,56
12	0	1,68	0	6	3,68	30	99,02±0,03	98,13±0,04	65,71±0,01	69,66±3,48
13	0	0	-1,68	6	2	9,8	98,26±0,04	97,27±0,08	45,57±0,11	60,63±3,80
14	0	0	1,68	6	2	55,2	98,69±0,04	99,18±0,05	62,59±0,03	73,48±1,13
15	0	0	0	6	2	30	98,04±0,08	97,8±0,03	57,99±0,01	67,61±1,74
16	0	0	0	6	2	30	97,04±0,00	97,58±0,01	51,22±0,03	66,25±1,13
17	0	0	0	6	2	30	97,53±0,04	97,05±0,03	58,41±0,62	65,97±0,60

Nota: (Ens.) ensaios; (turb.) turbidez; (cor ap.) cor aparente; (abs.) absorvância  $\lambda$ -254 nm.

De acordo com os resultados da Tabela 3, analisando simultaneamente todos os ensaios, as maiores porcentagens de remoção ocorreram nos ensaios: 7, 9 e 14. As menores eficiências de remoção foram observadas nos ensaios 1 e 11. Os ensaios em que as variáveis dependentes não

Realização



Correalização



Informações:

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



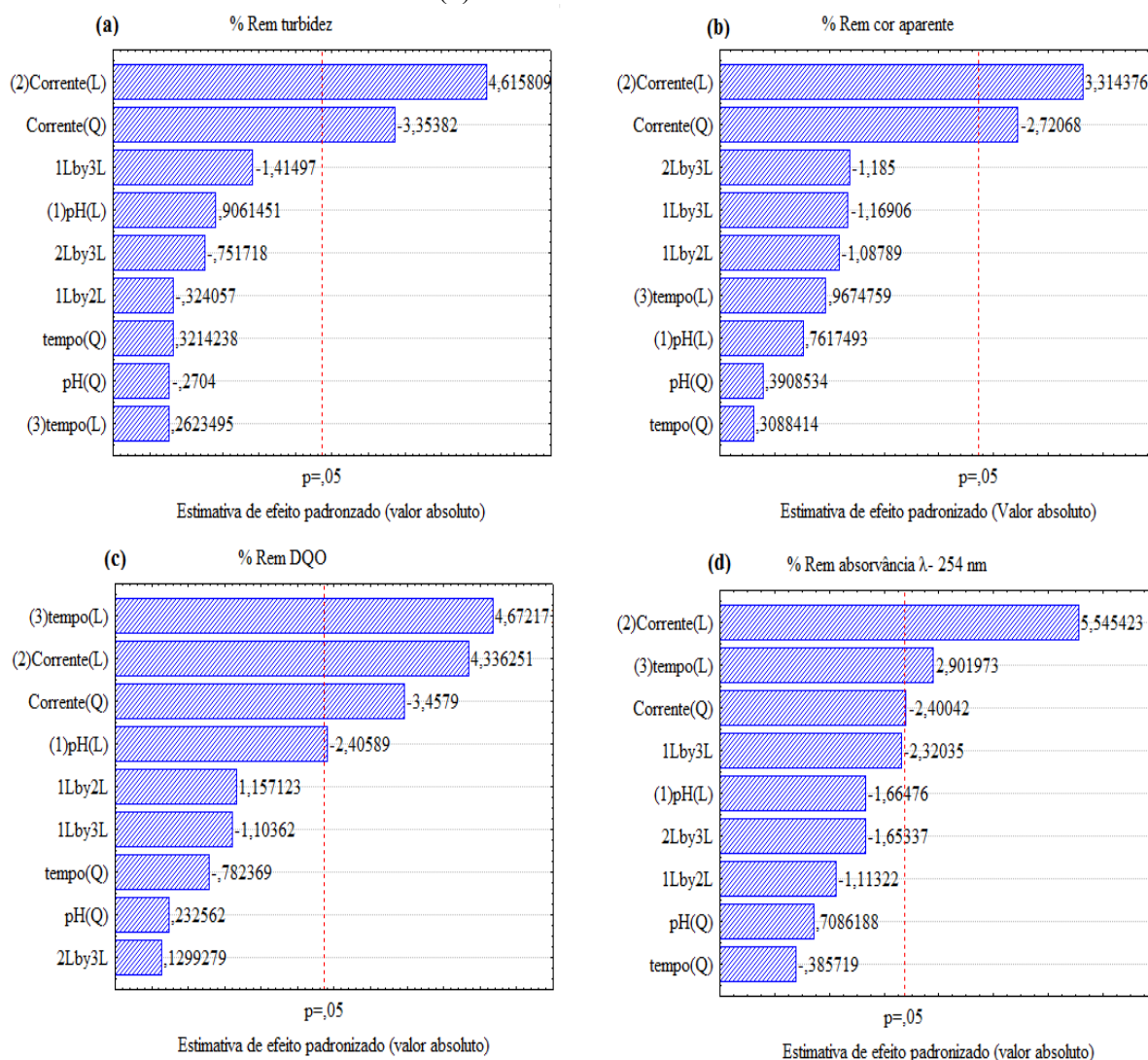
obtiveram remoção ou observa-se mínima remoção coincidem com as condições operacionais em que foi aplicado menor corrente elétrica ou tempo de tratamento.

### Otimização do processo de EF

Para validar o ajuste proposto pelos resultados obtidos, realizou-se ANOVA, a partir do modelo previsto no delineamento experimental para a remoção dos parâmetros cor, turbidez, DQO e absorvância  $\lambda$ -254 nm.

A primeira etapa de validação consiste na análise dos efeitos absolutos das variáveis independentes  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  por meio do gráfico de Pareto, ilustrado na Figura 1. No gráfico de Pareto, pode-se identificar os parâmetros e as interações que influenciam significativamente as variáveis dependentes, com 95 % de confiança, representado pela linha traçada vermelha. As variáveis lineares são representadas por (L) e as quadráticas por (Q), os sinais positivos ao lado das barras apontam um aumento na remoção dos parâmetros e os sinais negativos redução dos parâmetros.

Figura 1 - Gráfico de Pareto para as variáveis dependentes (a) Turbidez, (b) Cor aparente, (c) DQO e (d) Absorvância  $\lambda$ - 254 nm



Realização



Correalização



Informações:

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

Conforme a análise simultânea dos gráficos, a corrente elétrica em termos lineares se mostrou eficiente no intervalo de 95% de confiança para a remoção dos quatro parâmetros, e em termos quadráticos para remoção de turbidez, cor e DQO. A variável tempo de tratamento foi estatisticamente significativa em termos lineares na remoção de DQO e absorvância  $\lambda$ - 254 nm. O pH, em termos lineares, foi estatisticamente significativo na remoção de DQO. Os resultados da ANOVA estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - ANOVA do modelo previsto para a redução de DQO, turbidez, cor e absorvância  $\lambda$ - 254 nm de efluente lácteo tratado por EF com eletrodo de Al ao nível de significância de 95% ( $p < 0,05$ )

Parâmetro	Modelo quadrático	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	Fcal/ Ftab	p-valor
DQO	Regressão	1486,197	7	212,314	12,756 / 3,293	0,00050743
	Resíduos	149,796	9	16,644		
	Total	1635,993	16	228,958		
Turbidez	Regressão	2500,696	7	357,242	8,224 / 3,293	0,00265848
	Resíduos	390,972	9	43,441		
	Total	2891,668	16	400,683		
Cor	Regressão	12051,539	7	1721,648	6,082 / 3,293	0,00764864
	Resíduos	2547,524	9	283,058		
	Total	14599,063	16	2004,706		
Absorvância $\lambda$ -254 nm	Regressão	7036,581	7	1005,226	12,146 / 3,293	0,0006141
	Resíduos	744,87	9	82,763		
	Total	7781,451	16	1087,989		

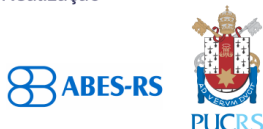
Nota: (Fcal.) Fcalculado; (Ftab) Ftabelado.

Observa-se que o p-valor das variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$ , mostrou-se estatisticamente satisfatório a 95% de confiança, para as variáveis dependentes. Ressalta-se que o valor do Fcalculado é maior que o Ftabelado, comprovando que o modelo estatístico proposto é válido.

### ***Desejabilidade Global***

Conforme foi observado na análise estatística, todas as variáveis dependentes foram significativas ao nível de 95 % de confiança. Desse modo, utilizou-se a função *Desirability*, do software *Statistica* ® 7, que permite a otimização de múltiplas variáveis dependentes, para determinar os valores operacionais otimizados das variáveis independentes (corrente, pH inicial e tempo) visando maior remoção das variáveis dependentes (DQO, turbidez, cor aparente e absorvância  $\lambda$ - 254 nm). O valor de desejabilidade global varia de 0 a 1, quanto mais próximo estiver de 1, mais próxima será a resposta obtida daquela pretendida. A função global obtida foi igual a 1, indicando assim uma excelente resposta. Pode-se observar na Figura 2 os valores ideais de tratamento por EF para o efluente bruto.

Realização



Correalização

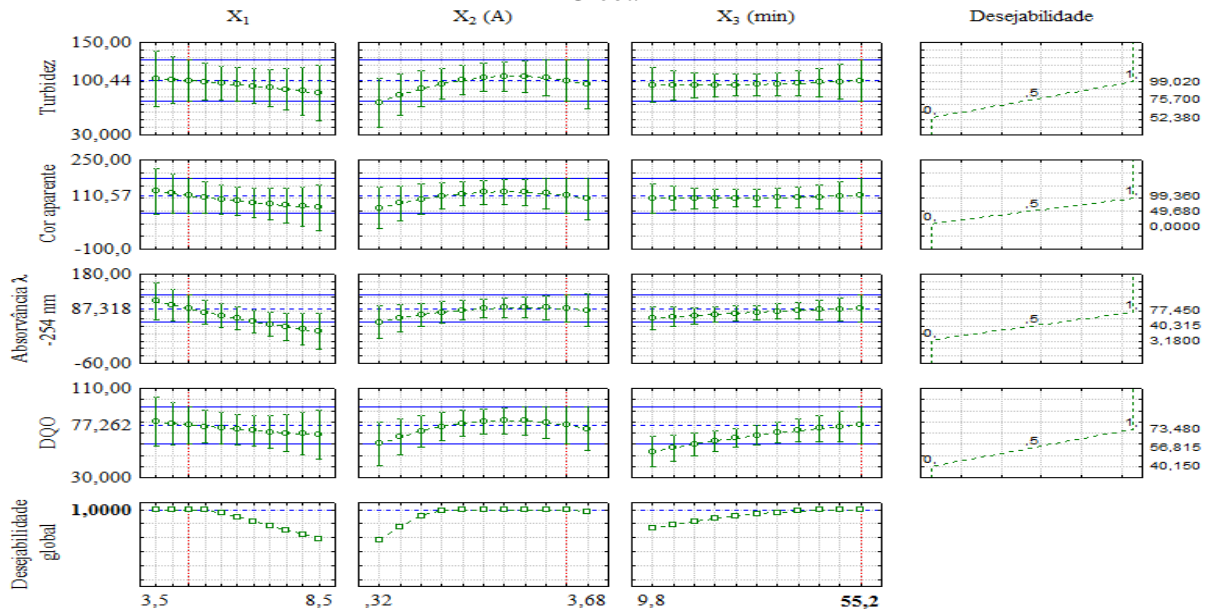


Informações:

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

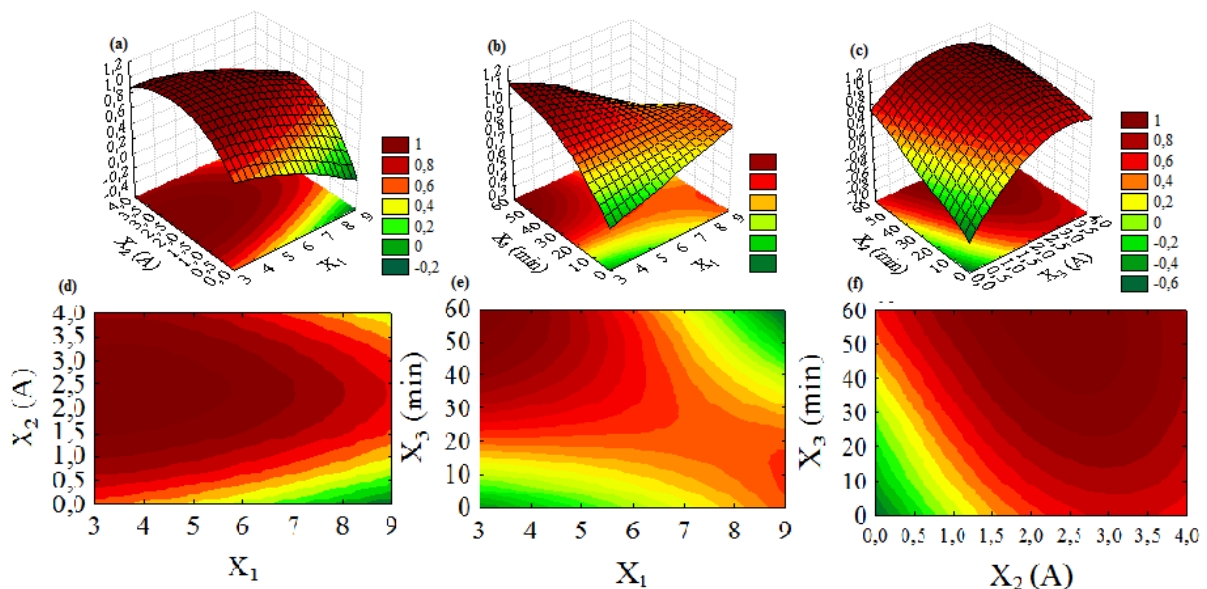


Figura 2 - Otimização simultânea das variáveis dependentes por meio da função de Desejabilidade Global



A linha vermelha nos gráficos indica os valores otimizados das variáveis  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  que corresponderam a: 4,5, 3,34 A e 55,2 min respectivamente. O intervalo em azul no gráfico representa a remoção prevista para as variáveis dependentes quando o efluente lácteo for tratado por EF nas condições otimizadas acima supracitadas. A partir dessas condições, espera-se que aconteça uma remoção de 100 % de turbidez, 100 % de cor aparente, 87,3 % de absorvância  $\lambda$ -254 nm e 77,3 % de DQO. Na Figura 3 estão representadas as superfícies de resposta e os perfis de contorno nas condições de desejabilidade.

Figura 3 - Remoção nas condições de desejabilidade global



Nota: (a) superfície de resposta considerando  $X_1$  e  $X_2$ ; (b) superfície de resposta considerando  $X_1$  e  $X_3$ ; (c) superfície de resposta considerando  $X_2$  e  $X_3$ ; (d) perfil de contorno considerando  $X_1$  e  $X_2$ ; (e) perfil de contorno considerando  $X_1$  e  $X_3$ ; (f) perfil de contorno considerando  $X_2$  e  $X_3$ .





A partir da Figura 3, é possível concluir que, considerando pH e corrente elétrica, a maior remoção das variáveis dependentes acontece quando o pH é baixo e a corrente é média. Já quando considera-se o pH e o tempo de tratamento, a maior remoção ocorre quando o tempo é alto e o pH é baixo. E, por fim, considerando o tempo de tratamento e a corrente, a maior remoção é observada quando os valores de tempo são altos e a corrente é média.

### Validação do modelo proposto

A partir da análise estatística e da função de desejabilidade global, aplicou-se a EF no efluente lácteo bruto nas condições de  $X_1$ ,  $X_2$  e  $X_3$  otimizadas a fim de validar os resultados obtidos na Figura 1. Na Tabela 5, é possível a comparar a remoção prevista supracitada com a remoção real.

Tabela 5 - Validação do modelo de desejabilidade global

Parâmetros	Efluente Bruto	Otimizado	% Remoção estimada	% Remoção Real
DQO ( $\text{mg L}^{-1}$ )	$7.462,92 \pm 86,49$	$2.019,70 \pm 86,00$	$77,30 \pm 0,00$	$72,95 \pm 1,16$
Turbidez (UNT)	$1.640,00 \pm 14,14$	$69,00 \pm 0,00$	$100,00 \pm 0,00$	$95,80 \pm 0,00$
Cor aparente (u.C)	$14.350,00 \pm 353,00$	$309,00 \pm 16,90$	$100,00 \pm 0,00$	$97,90 \pm 0,07$
Absorvância $\lambda$ - 254 nm (u.a)	$4,52 \pm 0,03$	$1,31 \pm 0,00$	$87,30 \pm 0,00$	$71,50 \pm 0,55$

A remoção de DQO real foi de  $72,95 \% \pm 1,16$ , valor próximo ao estimado (77,3 %). Este valor ( $2019,70 \pm 86,00 \text{ mg L}^{-1}$ ) não está de acordo com o valor estipulado pela Resolução CONSEMA N° 128/2006. Para Melchioris et al. (2016), a remoção de DQO foi 97 %, com os parâmetros otimizados de 60 minutos de tratamento, corrente de 5 V e pH 5. O aumento na corrente e no tempo de tratamento podem acarrear um aumento no valor gasto para aplicar a EF.

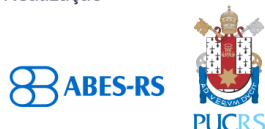
O parâmetro da turbidez apresentou um valor de 69 UNT, estando de acordo com os padrões de emissão da legislação. A porcentagem de remoção real ficou próxima a estimada. Resultado semelhante foi obtido por Bensadok et al. (2011), no tratamento de efluente lácteo com uso de eletrodos de Al e Ti/Pt, utilizando corrente elétrica de  $0,5 \text{ mAcm}^{-2}$ , pH de 6,6 e tempo de tratamento de 2 min, a remoção de turbidez foi de 96 %.

A remoção de cor aparente foi de 97,9 %, valor aproximado do estimado. Embora esse valor ainda esteja acima do padrão estabelecido nas Resoluções N° 357 e N° 430 do CONAMA (75 u.C), a alta remoção pode indicar diminuição na quantidade de sólidos, visto que eles são os principais agentes causadores de cor no efluente. Benazzi (2013), a partir das condições otimizadas de voltagem (7,5V), tempo (60 minutos) e distância entre eletrodos (2 cm), obteve uma remoção de cor de 99%.

A remoção da absorvância  $\lambda$ - 254 nm no efluente lácteo tratado por EF nas condições otimizadas foi de 71,5 %, Almeida et al. (2004) apresenta que, em meio ácido, os compostos orgânicos são mais rapidamente removidos, devido ao ataque seletivo aos compostos aromáticos. Comparando com o valor do bruto, é possível analisar que houve remoção dos compostos orgânicos e, conseqüentemente, a quebra dos compostos aromáticos, que é evidenciada pela diferença de altura da banda de absorção.

Os parâmetros físico-químicos analisados na caracterização inicial do efluente lácteo bruto foram novamente avaliados após a EF com uso de eletrodo de sacrifício de Al, utilizando as condições de tempo de tratamento, pH e corrente elétrica otimizadas. Os resultados estão expostos na Tabela 6.

Realização



Correalização



Informações:

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



Tabela 6 - Caracterização do efluente após EF

Parâmetros	Efluente lácteo tratado por EF (otimizado)
Temperatura (C°)	27,00 ± 1,41
pH	9,09 ± 0,03
Condutividade (uS cm <sup>-1</sup> )	11,45 ± 0,06
OD (mg L <sup>-1</sup> )	7,00 ± 0,00
Sólidos sedimentáveis (mg L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	0,00
ST (mg L <sup>-1</sup> )	8235,00 ± 111,00
STF (mg L <sup>-1</sup> )	6350,00 ± 127,00
STV (mg L <sup>-1</sup> )	1885,00 ± 104,00
SST (mg L <sup>-1</sup> )	350,00 ± 141,00
SSF (mg L <sup>-1</sup> )	200,00 ± 21,00
SSV (mg L <sup>-1</sup> )	150,00 ± 70,00
SDT (mg L <sup>-1</sup> )	7885,00 ± 189,00
SDF (mg L <sup>-1</sup> )	6150,00 ± 84,00
SDV (mg L <sup>-1</sup> )	1735,00 ± 233,00
Óleos e graxas (mg L <sup>-1</sup> )	76,66 ± 4,71
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	3,50 ± 0,00

O teor de óleos e graxas diminuiu significativamente após a EF, visto que o efluente bruto possuía 880,00 ± 107 mg L<sup>-1</sup> e o tratado possui 76,66 ± 4,71 mg L<sup>-1</sup>, ou seja, mais de 90 % de remoção. Apesar da alta remoção, esse valor ainda se encontra acima do limite estabelecido na legislação para o teor de óleos e graxas de origem animal ou vegetal, que é, no máximo, 20 mg/L. Os sólidos, apesar de apresentarem redução, ainda estão em desacordo com os limites estipulados na legislação, podendo se fazer necessário a aplicação de um pós-tratamento.

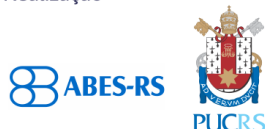
#### 4. CONCLUSÃO

A partir da caracterização do efluente bruto de uma indústria de produtos lácteos por meio da análise de parâmetros físico-químicos, verificou-se a existência de parâmetros (pH, DQO, DBO, OD, turbidez, cor aparente, óleos e graxas, sólidos suspensos) em desacordo com as Resoluções N° 357 e N° 430 do CONAMA, e a N° 128 do CONSEMA evidenciando a necessidade de tratamento adequado do efluente para possibilitar o lançamento em corpo hídrico receptor.

Realizou-se um planejamento fatorial completo DCCR (2<sup>3</sup>) com 3 repetições no ponto central e 6 repetições nos pontos axiais para obter a interação simultânea entre todas as variáveis. A partir destes resultados, a ANOVA assegurou, com 95% de confiabilidade estatística, a influência das variáveis independentes corrente elétrica, tempo de tratamento e pH para a máxima eficiência do tratamento de EF com uso de eletrodo de Al na remoção das variáveis dependentes, DQO, absorvância λ-254 nm, cor aparente e turbidez.

A análise da função desejabilidade global e da superfície de resposta, possibilitou a determinação dos valores otimizados das variáveis independentes, sendo estes: pH inicial de 4,5, corrente elétrica 3,34 A e tempo de tratamento de 55,2 min. A partir dessas condições otimizadas, obteve-se uma remoção real de 72,95% para DQO, 95,8% para turbidez, 97,9% para cor aparente e 71,5% para absorvância λ-254 nm.

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

Por fim, o uso do DCCR, da ANOVA, da função desejabilidade global e superfície de resposta e contorno, possibilitaram concluir que o tratamento do efluente lácteo por EF mostrou-se eficiente para a remoção das variáveis dependentes consideradas neste estudo. Sugere-se uma etapa de pós-tratamento para os parâmetros que, mesmo com a alta remoção, ainda estão em desacordo com os limites estipulados nas legislações.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, E. et al. Tratamento de efluentes industriais por processos oxidativos na presença de ozônio. **Química Nova**, São Paulo, v. 27, n. 5, p. 818-824, 2004.

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

BENAZZI, T. L. **Otimização de um sistema de eletrofloculação em fluxo contínuo para o tratamento de efluentes líquidos das indústrias de laticínios**. Erechim, 121 p., 2013. Tese (Doutorado) - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai.

BENSADOK, K.; HANAFI, N. E.; LAPICQUE, F. Electrochemical treatment of dairy effluent using combined Al and Ti/Pt electrodes system. **Desalination**, v. 280, p. 244–251, 2011.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA**. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul**. Resolução nº 128 de novembro de 2006.

MELCHIORS, M. S. et al. Treatment of wastewater from the dairy industry using electroflocculation and solid whey recovery. **Journal of Environmental Management**, v. 182, p. 574 - 580, 2016.

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.

ROGGENBACK, J. **Tratamento dos efluentes líquidos em duas indústrias de laticínios dos campos gerais**. Curitiba, 51 p., 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Universidade Federal do Paraná.

SARAIVA, C. B. et al. Water consumption and effluent generation in a small dairy industry. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**, v. 367/368, n. 64, p. 10-18, 2009.

STRATE, J. **Otimização de um sistema de eletrofloculação em fluxo contínuo para o tratamento de efluentes líquidos das indústrias de laticínios**. Lajeado, 83 p., 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Centro Universitário Univates.

Realização

ABES-RS



Correalização



Informações:

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



11º SIMPÓSIO  
INTERNACIONAL  
DE QUALIDADE  
AMBIENTAL

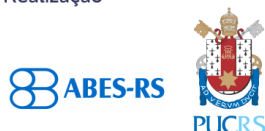
02 A 04 DE  
OUTUBRO  
PORTO ALEGRE-RS  
TEATRO DA PUCRS



TEMA  
meio ambiente,  
política & economia

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias**, vol. 1. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 2005, 452p.

Realização



Correalização



Informações:

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