

II-016 - ANÁLISE DE REMOÇÃO DE COR E TURBIDEZ EM EFLUENTE DE FRIGORÍFICO DE SUÍNOS TRATADO POR ELETROCOAGULAÇÃO

Fábio Orssatto⁽¹⁾

Tecnólogo Ambiental. Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Docente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da UTFPR – câmpus Medianeira

Flavia Manente da Silva

Graduanda em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Bolsista no grupo PETAMB

Isabela de Souza Araújo

Graduanda em Engenharia Ambiental pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Bolsista no grupo PETAMB

Thainá Harris Vieira

Graduanda em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Brasil, 4232 – Parque Independência - Medianeira - PR - CEP: 85884-000 - Brasil - Tel: (45) 3240-8120 - e-mail: orssatto@utfpr.edu.br

RESUMO

Devido a expansão da atividade industrial a geração de resíduos cresce a cada dia. Entre eles podem-se citar os efluentes líquidos, que possuem alta carga poluidora e normalmente são gerados em grandes quantidades diariamente nas agroindústrias. Realizar o tratamento adequado desses efluentes é extremamente importante para garantir a preservação dos recursos naturais, uma vez que é comum lança-los em corpos hídricos. Um das técnicas que vem sendo estudada para realizar este tratamento é a eletrocoagulação, que tem seu funcionamento baseado na passagem de corrente elétrica por eletrodos metálicos que permanecem imersos no efluente e com isso promover a coagulação dos coloides. Com isso o objetivo do estudo foi avaliar a eficiência da eletrocoagulação utilizando efluente de abatedouro e frigorífico de suínos, para isso montou-se um delineamento composto central rotacional (DCCR) com 3 variáveis independentes: corrente elétrica aplicada, tempo de eletrólise e distância entre os eletrodos, obtendo um fatorial completo 3^3 com adição de 6 pontos axiais e 3 repetições no ponto central. Avaliando a remoção de cor e turbidez encontraram-se os percentuais de 97,96% e 98,96%, respectivamente, além disso a análise do DCCR permitiu encontrar a região de melhor remoção da cor para valores de corrente elétrica entre 0,62 e 1,5 A com tempo de eletrólise de 20min a 25min57s e distância entre os eletrodos de 2,4 a 3,63 cm.

PALAVRAS-CHAVE: Cor, DCCR, Turbidez.

INTRODUÇÃO

A expansão da atividade industrial trouxe consigo inúmeros benefícios como também diversos impactos, sendo que a geração de efluentes com alta carga orgânica é um dos mais expressivos. Com o intuito de minimizar a poluição ambiental inerente ao descarte desses efluentes em corpos hídricos é necessário realizar um tratamento adequado. Normalmente utilizam-se para isso operações físicas, químicas e processos biológicos.

No que diz respeito a tratamentos alternativos, os processos eletrolíticos vêm ganhando visibilidade, principalmente devido a simplicidade em operar os equipamentos, além da rapidez do processo aliado a produção baixa de lodo (KOBIA et al., 2010). Sahu et al. (2014) definem o processo eletrolítico como a sinergia entre três mecanismos: eletrocoagulação, com a desestabilização dos coloides devido a liberação de íons metálicos; eletroflotação, que é a interação entre as bolhas de gás formado e as partículas desestabilizadas e por fim, a eletroxidação, que envolve a decomposição da matéria orgânica.

Para Nouri et al. (2010) a eletroflotação envolve três processos interdependentes: electroquímica, coagulação e hidrodinâmica que atuam simultaneamente. Vasudevan; Oturan (2014) definem a unidade de eletrocoagulação como uma célula eletrolítica com ânodo e um cátodo, que podem ser do mesmo material ou não. Com a aplicação de corrente elétrica a esses eletrodos, ocorre a corrosão do ânodo, dando origem ao coagulante.

Diante do exposto o objetivo do trabalho consistiu em avaliar a eficiência da eletrocoagulação aplicada no tratamento de efluente de abatedouro e frigorífico de suínos variando a distância entre os eletrodos, corrente elétrica aplicada e tempo de eletrólise dos ensaios.

METODOLOGIA

Para a realização do estudo utilizou-se efluente utilizado de um abatedouro e frigorífico de suínos que gera em torno de $4.800 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$ de efluente, que é submetido ao tratamento com operações físicas, seguindo para o tratamento biológico e por fim operações físico-químicas. A coleta ocorreu após o tratamento físico, na saída dos decantadores, como pode ser visualizado na Figura 1.

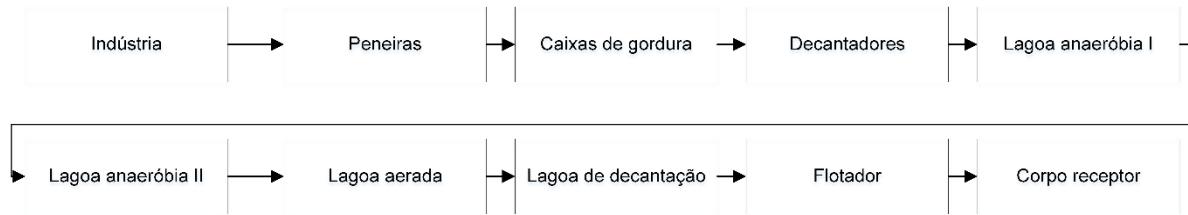


Figura 1. Fluxograma do tratamento de efluente na indústria

Para avaliar a eficiência da eletrofloculação analisaram-se as remoções de cor e turbidez por meio de um delineamento composto central rotacional (DCCR) com três variáveis independentes: X_1 que corresponde ao tempo de eletrólise (min), X_2 que refere-se a distância entre os eletrodos (cm) e X_3 que relaciona-se com a corrente elétrica aplicada (A), obtendo um fatorial completo 2^3 com 6 pontos axiais e 3 repetições no ponto central, totalizando 17 ensaios. Os valores reais e codificados podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1. Matriz de ensaios do planejamento experimental

Ensaio	X_1	X_2	X_3
1	-1 (14'3'')	-1 (3,63)	-1 (0,62)
2	1 (25'57'')	-1 (3,63)	-1 (0,62)
3	-1 (14'3'')	1 (7,27)	-1 (0,62)
4	1 (25'57'')	1 (7,27)	-1 (0,62)
5	-1 (14'3'')	-1 (3,63)	1 (1,28)
6	1 (25'57'')	-1 (3,63)	1 (1,28)
7	-1 (14'3'')	1 (7,27)	1 (1,28)
8	1 (25'57'')	1 (7,27)	1 (1,28)
9	-1,68 (10')	0 (5,45)	0 (0,95)
10	1,68 (30')	0 (5,45)	0 (0,95)
11	0 (20')	-1,68 (2,4)	0 (0,95)
12	0 (20')	1,68 (8,50)	0 (0,95)
13	0 (20')	0 (5,45)	-1,68 (0,40)
14	0 (20')	0 (5,45)	1,68 (1,50)
15	0 (20')	0 (5,45)	0 (0,95)
16	0 (20')	0 (5,45)	0 (0,95)
17	0 (20')	0 (5,45)	0 (0,95)

Os ensaios de eletrocoagulação foram conduzidos em processo de batelada, para tanto utilizou-se um bêquer onde adicionaram-se 0,8 L de efluente, que foi mantido em agitação constante. Os eletrodos de alumínio, com dimensões de 10x5cm, foram completamente imersos no efluente e conectados a uma fonte de corrente contínua, que permitia o controle da corrente elétrica aplicada. Para ajustar a distância entre os eletrodos utilizou-se uma rosca sem fim, o sistema de eletrocoagulação pode ser visualizado na Figura 2.



Figura 2. Sistema de eletrocoagulação com reator batelada de bancada

As análises físico-químicas seguiram os padrões estipulados pela *Apha Standards Methods* (2011), sendo que para a cor utilizou-se o método espectrofotométrico (APHA 2120 C), para a turbidez o método nefelométrico (APHA 2130 B) além do pH para a caracterização do efluente (APHA 4500-H⁺ B).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da análise da Figura 3 percebe-se que todas as remoções foram elevadas, situando-se no intervalo entre 90 e 100% de remoção. No caso da cor destaca-se o ensaio 11, realizado com distância de 2,4 cm, corrente elétrica de 0,95A por 20 minutos, atingindo a remoção de 97,96%. Para a turbidez a maior remoção foi de 98,96% observada no ensaio 2, conduzido com distância de 3,63cm, corrente elétrica de 0,62A por 25min57s.

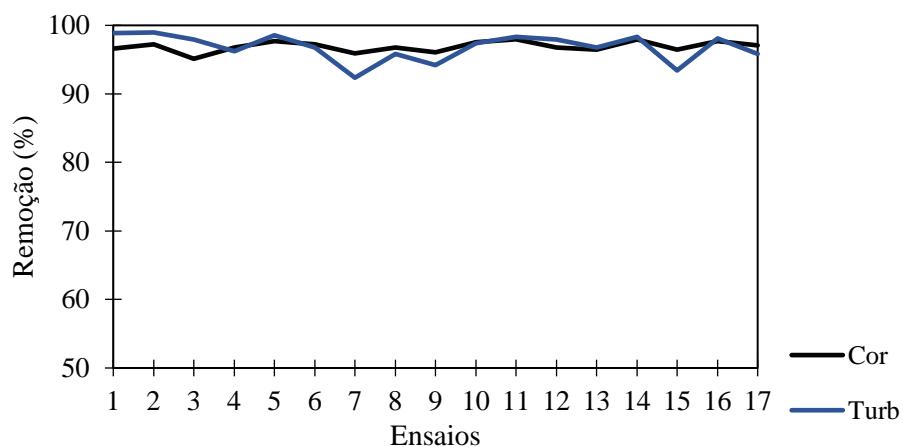


Figura 3. Eficiência de remoção de cor e turbidez

Na Tabela 2 pode-se observar os resultados para a análise de regressão da turbidez, onde percebe-se que, em um nível de confiança de 95% nenhuma das variáveis foi significativa, já que obtiveram o p-valor superior a 0,05. Percebe-se ainda que as variáveis X_1 (Q), X_2 (L), X_3 (L) e a interação entre X_2 e X_3 possuem efeito negativo sobre a remoção da turbidez, ou seja, ao aumentar o nível da variável de -1 para 1 a remoção sofreu decréscimo. As demais variáveis apresentaram efeito positivo para a remoção do parâmetro.

Tabela 2. Análise de regressão para a remoção da turbidez

Fator	Efeito	Erro padrão	t(7)	p-valor	Coeficientes de regressão
Média	95,788	1,252	76,491	0,000	95,788
X ₁ (L)	0,816	1,177	0,694	0,510	0,408
X ₁ (Q)	-0,117	1,297	-0,091	0,930	-0,059
X ₂ (L)	-1,672	1,177	-1,420	0,198	-0,836
X ₂ (Q)	1,535	1,297	1,184	0,275	0,767
X ₃ (L)	-0,851	1,177	-0,723	0,493	-0,426
X ₃ (Q)	1,122	1,297	0,865	0,416	0,561
X ₁ .X ₂	0,874	1,537	0,569	0,587	0,437
X ₁ .X ₃	0,810	1,537	0,527	0,615	0,405
X ₂ .X ₃	-0,874	1,537	-0,569	0,587	-0,437

Desta maneira o modelo matemático gerado a partir da regressão dos dados não é válido a 95% de confiança, uma vez que o Fcalculado é inferior ao Ftabelado, como pode ser visualizado na Tabela 3, ou seja, o modelo não explica o comportamento dos resultados observados para a remoção da turbidez.

Tabela 3. ANOVA para a análise de regressão da turbidez

Termo	SQ	GL	QM	Fcalculado	Ftabelado	p-valor
Regressão	28,338	9	3,149	0,666	3,677	0,721
Resíduos	33,071	7	4,724			
Total	61,409	16				

A análise de regressão para os resultados de remoção da cor evidenciou que as variáveis lineares relacionadas a X₁, X₂ e X₃ são significativos com 95% de confiança, sendo as variáveis X₁ e X₃ linear possuem efeito positivo sobre a remoção da cor, já a variável X₂ linear possui efeito negativo, como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4. Análise de regressão para a remoção de cor

Fator	Efeito	Erro padrão	t(7)	p-valor	Coeficientes de regressão
Média	97,120	0,276	351,261	0,000	97,120
X ₁ (L)	0,747	0,260	2,873	0,024	0,373
X ₁ (Q)	-0,396	0,286	-1,385	0,209	-0,198
X ₂ (L)	-0,928	0,260	-3,570	0,009	-0,464
X ₂ (Q)	-0,004	0,286	-0,016	0,988	-0,002
X ₃ (L)	0,641	0,260	2,467	0,043	0,321
X ₃ (Q)	-0,118	0,286	-0,413	0,692	-0,059
X ₁ .X ₂	0,578	0,339	1,703	0,132	0,289
X ₁ .X ₃	-0,456	0,339	-1,345	0,221	-0,228
X ₂ .X ₃	-0,053	0,339	-0,155	0,881	-0,026

A ANOVA para a remoção da cor demonstrou que o modelo matemático encontrado é válido com 95% de confiança, já que o Fcalculado é superior ao Ftabelado, de acordo com a Tabela 5, dessa maneira a remoção da cor pode ser descrita pela Equação 1, além de apresentar R² de 0,829.

Tabela 5. ANOVA para a análise de regressão da cor

Fonte	SM	GL	QM	Fcalculado	Ftabelado	p-valor
Regressão	7,812	9	0,868	3,769	3,677	0,047
Resíduo	1,612	7	0,230			
Total	9,424	16				

$$\% \text{cor} = 97,120 + 0,373X_1 - 0,198X_1^2 - 0,464X_2 - 0,002X_2^2 + 0,321X_3 - 0,059X_3^2 + 0,289X_1X_2 - 0,228X_1X_3 - 0,026X_2X_3 \quad (1)$$

O gráfico de contorno da relação entre tempo de eletrólise e distância entre os eletrodos, Figura 4, evidencia que embora a distância tenha efeito negativo na remoção de cor, é possível obter remoção elevada mesmo com uma distância grande entre os eletrodos, desde que o tempo seja superior a 20 minutos. A região entre 2,4 e 3,63 cm para distância e tempo de 10min a 25min57s se destaca com os maiores percentuais de remoção.

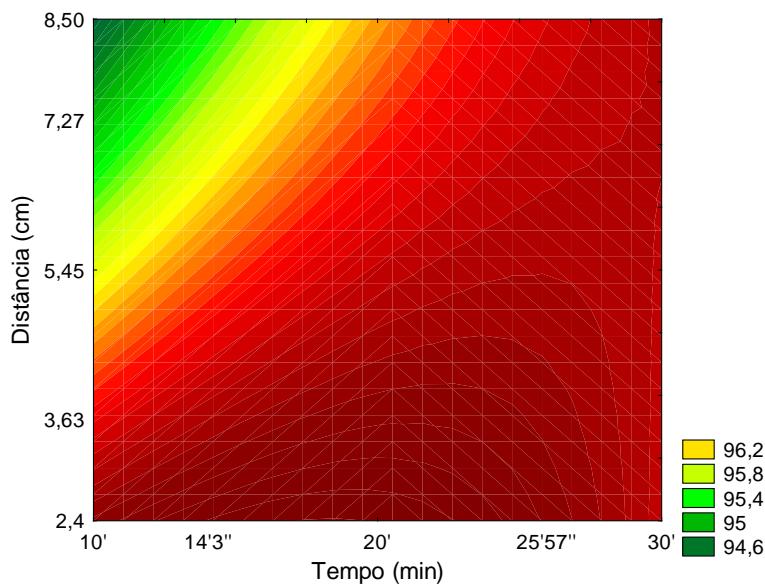


Figura 4. Superfície de contorno para a remoção da cor em função do tempo (X₁) e da distância

Com relação a interação entre tempo e corrente, que é representada pelo gráfico visualizado na Figura 5, a área de remoção elevada compreende uma faixa extensa, sendo possível alcançá-la com várias combinações. Porém, a região com os valores mais elevados encontra-se na faixa de corrente entre 0,62 e 1,5A e tempo de 20min a 25min57s

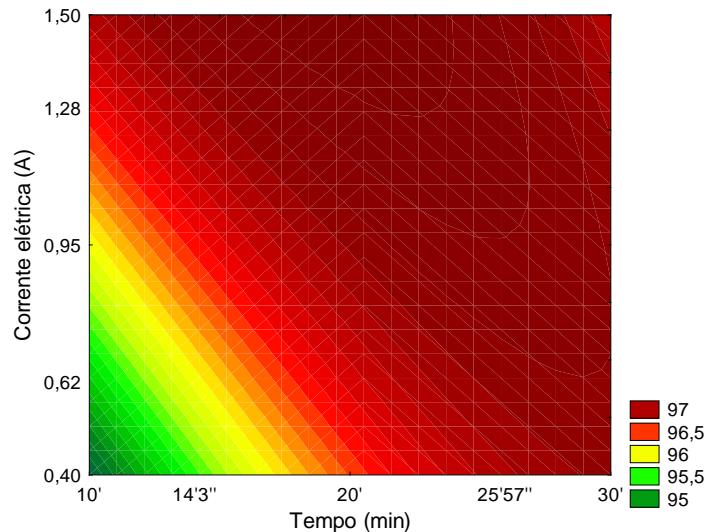


Figura 5. Superfície de contorno para a remoção da cor em função do tempo (X₁) e da corrente elétrica (X₃)

A Figura 6 evidencia que a região ótima, considerando a interação entre corrente elétrica e distância entre os eletrodos, encontra-se na faixa de 0,62 a 1,5 A para a corrente elétrica, com distância entre os eletrodos de 2,4 a 3,63 cm.

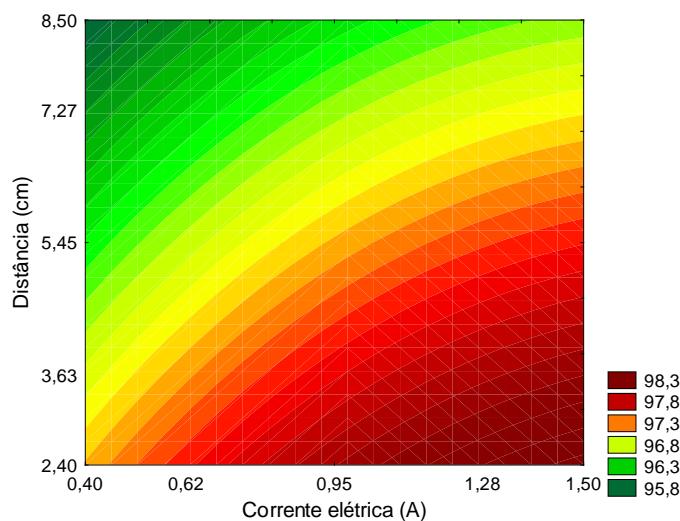


Figura 6. Superfície de contorno para a remoção da cor em função da distância (X_2) e da corrente elétrica (X_3)

Analizando os gráficos percebe-se claramente a influência do efeito das variáveis, onde os maiores percentuais de remoção de remoção encontram-se em regiões onde a corrente ou o tempo de eletrólise são elevados, indicando que as variáveis possuem efeito positivo. Porém, para a distância ocorreu o oposto, os maiores percentuais foram visualizados em regiões de pequena distância entre os eletrodos, reflexo do efeito negativo associado a variável.

Valente *et al.* (2015) utilizaram efluente de laticínio para testar a eficiência da eletrocoagulação, tendo como variáveis independentes a densidade de corrente elétrica, tempo de eletrólise, pH inicial e distância entre os eletrodos. A condição otimizada do estudo, correspondente a 21 minutos de eletrólise com densidade de corrente de $61,6 \text{ A.m}^{-2}$ e pH em torno perto de 5 promove remoção de 57% de DQO e 99% de turbidez. Os autores concluíram que a distância entre os eletrodos não é significativa na remoção de matéria orgânica, porém menores distâncias resultam em menores custos, já que ocorre redução da energia necessária para o processo.

Tak *et al.* (2015) empregaram a eletrocoagulação no tratamento de efluente oriundo da pecuária encontrando remoção máxima de 95,3% para DQO e 93% para cor na condição de 30 minutos de eletrólise com densidade de corrente de 30 mA.cm^{-2} e pH inicial de 8.

Paulista *et al.* (2016) avaliaram a remoção de cor, turbidez e DQO de efluente de frigorífico avícola tratado com eletrocoagulação com corrente de 0,24 A e tempo de 15 minutos, alcançando remoção de 96% da cor, 94% para turbidez e 80,82% para DQO.

Módenes *et al.* (2017) utilizaram efluente de abatedouro de aves para avaliar o desempenho da eletrocoagulação, sendo que a máxima eficiência foi encontrada com as condições de pH inicial de 8, corrente elétrica de 2 A e tempo de eletrólise de 50 minutos, com remoção de 92% da DQO, 99,63% da cor e 99,16% para turbidez.

Comparando os percentuais de remoção obtidos com dados da literatura percebe-se que os resultados estão semelhantes, reforçando a eficiência da eletrocoagulação para realizar o tratamento de efluentes de diversas características.

CONCLUSÃO

Analizando os resultados obtidos conclui-se que, embora o modelo matemático para a remoção de turbidez não tenha sido válido, a técnica de eletroflocação é eficiente para o tratamento de efluentes de abatedouro e frigorífico de suínos.

O tratamento foi capaz de remover até 97,96% da cor no ensaio 11 (0,95A, 20 minutos e 2,4cm) e 98,96% da turbidez no ensaio 2 (0,62A, 25min57s e 3,63 cm).

Além disso percebe-se que com o aumento da distância ocorre uma diminuição da eficiência de remoção da cor. Analisando simultaneamente as regiões de remoção ótima nota-se que a distância entre os eletrodos ideal situa-se entre 2,4 e 3,63cm, com tempo de 20min a 25min57s e corrente elétrica de 0,62 a 1,5A.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**, Washington, DC: APHA, 2011
2. KOBYA, M.; DEMIRBAS, E.; DEDELI, A.; SENSOY, M. T.; Treatment of rinse water from zinc phosphate coating by batch and continuous electrocoagulation processes; **Journal of Hazardous Materials**, v. 173 ed.3 p. 326-334, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409013831>> acessado em 05 de abril de 2018
3. MÓDENES, A. N.; ESPINOZA-QUIÑONES, F.R.; YASSUE, P. H.; PORTO, T. M.; THEODOR, P. S.; Aplicação da técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouro de aves; **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 3, maio-junho, 2017. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v22n3/1809-4457-esa-22-03-00571.pdf>> acessado em 28 de março de 2019
4. NOURI, J.; MAHVI, A. H.; BAZRAFSHAN,E.; Application of electrocoagulation process in removal of zinc and copper from aqueous solutios by aluminum electrodes, **Int. J. Environ. Res.**, v. 4, ed.2, p. 201-208, 2010. Disponível em: <https://ijer.ut.ac.ir/article_10_60a7441d001d5cfa6b871adf655cbd80.pdf> acessado em 05 de abril de 2018
5. PAULISTA, L. O.; THEODORO, J. D. R.; PINHEIRO, A. L. N.; THEODORO, P. S.; **Tratamento de efluente de frigorífico avícola com eletroflotação e eletrocoagulação**, Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Foz do Iguaçu, 2016. Disponível em <<http://www.confea.org.br/media/contecc2016/quimica/tratamento%20de%20efluente%20de%20frigor%20%20ADfico%20av%20ADcola%20com%20eletroflota%20C3%A7%C3%A3o%20e%20eletrocoagula%C3%A7%C3%A3o.pdf>> acessado em 28 de março de 2019
6. SAHU, O.; MAZUMDAR, B.; CHAUDHARI, P. K.; Treatment of wastewater by electrocoagulation: a review; **Environmental Science and Pollution Research**; v. 21; p. 2397-2413, 2014. Disponível em: <link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11356-013-2208-6.pdf> acessado em 12 de abril de 2018
7. TAK, B.; TAK, B.; KIM, Y.; PARK, Y.; YOON, Y.; M. G.; Optimization of color and COD removal from livestock wastewater by electrocoagulation process: Application of Box-Behnken design (BBD), **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 28, 2015. Disponível em: <dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.008> acessado em 23 de março de 2019
8. VALENTE, G. de F. S.; MENDONÇA, R. C. S.; PEREIRA, J.A A. M.; The Efficiency of electrocoagulation using aluminum electrodes in treating wastewater from a dairy industry; **Ciência Rural**; v. 45. n.9, julho – 2015. Disponível em: <dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20141172> acessado em 28 de março de 2019
9. VASUDEVAN, S.; OTURAN, M. A.; Electrochemistry: as cause and cure in water pollution-na overview; **Environmental Chemistry Letters**, v. 12 ed.1 p. 97-108, 2014. Disponível em: <link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10311-013-0434-2.pdf> acessado em 05 de abril de 2018