



## Otimização de um sistema integrado de tratamento de efluente: Eletrocoagulação e Flotação por Ar Dissolvido (FAD)

### *Optimization of an integrated effluent treatment system: Electrocoagulation and Dissolved Air Flotation (DAF)*

Christian C. Schmitz (orientado)\*, Eduardo Eyng (orientador)†, Ruan Bocchi. Autor‡

#### RESUMO

Uma atividade intimamente ligada ao Brasil é a indústria de abate. No entanto, o departamento é responsável pela geração de resíduos em grande escala e pelo desenvolvimento de impactos ambientais. Esse tipo de tratamento de efluente pode proporcionar à empresa o descarte correto permitido por lei, podendo até ser reaproveitado, trazendo diversos benefícios econômicos. O uso de abordagens combinadas no tratamento de efluentes está sendo amplamente aplicado, especialmente para matrizes complexas como de frigoríficos de suínos, assim o presente trabalho teve como proposta inicial a junção dos processos do tratamento da EC com a FAD em um reator em batelada, buscando a maior eficiência na remoção da matéria orgânica do efluente e frigorífico de suíno, usando o Delineamento Composto Central (DCC) como ferramenta para avaliar os efeitos do tempo de eletrólise e densidade de corrente elétrica. Optou-se em executar o tratamento eletroquímico e a FAD separadamente, sendo que esta última tecnologia será objeto de estudo da continuidade do projeto de pesquisa. As condições operacionais avaliadas foram a densidade de corrente elétrica, pressão de saturação, pH inicial e o tempo de retenção hidráulica, e utilizando o Delineamento Composto Central (DCC) para embasar a otimização das operações. As remoções obtidas no estudo alcançaram uma eficiência na remoção de DQO, turbidez e cor, com resultados de eletrocoagulação sendo em sua maioria superiores a 80%.

**Palavras-chave:** Otimização, Tratamento Eletroquímico, Delineamento Composto Central.

#### ABSTRACT

An activity closely linked to Brazil is the slaughter industry. However, the department is responsible for large-scale waste generation and the development of environmental impacts. This type of effluent treatment can provide the company with the correct disposal allowed by law, and can even be reused, bringing several economic benefits. The use of combined approaches in the treatment of effluents is being widely applied, especially for complex matrices such as pig slaughterhouses, so the present work had as its initial proposal the joining of EC treatment processes with FAD in a batch reactor, seeking greater efficiency in the removal of organic matter from the effluent and swine refrigerator, using the Central Composite Design (DCC) as a tool to evaluate the effects of electrolysis time and electric current density. It was decided to carry out the electrochemical treatment and the FAD separately, and this latest technology will be the object of study for the continuity of the research project. The operational conditions evaluated were electric current density, saturation pressure, initial pH and hydraulic retention time, and using the Central Composite Design (DCC) to support the optimization of operations. The removals obtained in the study reached an efficiency in the removal of COD, turbidity and color, with electrocoagulation results being mostly above 80%.

**Keywords:** optimization, Electrochemical Treatment, Central Composite Design.

\*Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná; [christianschmitz@alunos.utfpr.edu.br](mailto:christianschmitz@alunos.utfpr.edu.br)

† Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Medianeira; [eduardoeyng@utfpr.edu.br](mailto:eduardoeyng@utfpr.edu.br)

‡ Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, Brasil; [ruan\\_bocchi@hotmail.com](mailto:ruan_bocchi@hotmail.com)



## 1 INTRODUÇÃO

Os Frigoríficos e abatedouros de suínos geram um efluente com grande teor de poluição, e a composição do efluente é derivado do abate dos suínos, e produzido pela mistura da água de processamento na linha de abate e na limpeza de vísceras animais, o que forma um acúmulo de matéria orgânica, que é o principal poluente gerado pelos frigoríficos de suínos e geram grandes quantidades de água residuária (MORALES *et al.*, 2009, BUSTILLO – LECOMPTE; MEHRVAR, 2015).

Os efluentes de frigoríficos de suínos têm características marcantes, por conter uma grande carga de matéria orgânica, com isso foi analisado quais as características principais de um efluente de frigorífico de suínos: pH, Demanda Química e Biológica de Oxigênio (DQO e DBO), Óleos e Graxas, Sólidos Suspensos, Nitrogênio Kjeldahl (NTK) e Fósforo, segundo os seguintes autores, como pode ser visto na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos de efluentes de frigoríficos caracterizados por diferentes pesquisadores.

Referências	Efluente	Caracterização do Efluente					
		pH	DQO (mg/L)	DBO (mg/L)	NTK (mg/L)	Fósforo total (mg/L)	Sólidos suspensos (mg/L)
<b>Aguilar et al. (2002)</b>	Frigorífico	7,03	5398	2763	71,7	71,5	1271
<b>Bustillo-Lecompte et al. (2014)</b>	Frigorífico	6,95	4221	1209	427	-	1167
<b>Borja et al. (1995)</b>	Frigorífico	6,7	5050	3120	310	30	100
<b>Lopes Gil (2010)</b>	Frigorífico de suínos	7,25	27-64	12-19	10 - 38	1,3 - 6	8 - 30
<b>Caixeta, Cammarota e Xavier (2002)</b>	Frigorífico de suínos e bovinos	6,45	2000 - 6200	1300 - 2300	70 - 240	15 - 40	850 - 6300

Fonte: Autoria Própria (2021)

Enfatizando que os efluentes industriais podem ter diferentes características, até mesmo em indústrias do mesmo seguimento, dependendo do uso da água e de seu gerenciamento na indústria (VON SPERLING, 2005). Os efluentes de frigoríficos que normalmente apresentam uma alta concentração de sólidos e matéria orgânica, portanto deve-se garantir um tratamento em que o lançamento em corpos hídricos ou a fertirrigação em solos ocasione o mínimo de contaminação possível.

Um método alternativo de tratamento é a eletrocoagulação (EC), esse processo tem atraído grande atenção no tratamento de efluentes industriais devido à sua versatilidade e compatibilidade ambiental (MENESES *et al.*, 2012). A EC é um método eletroquímico baseado na corrosão eletrolítica através de ânodos de sacrifício e decomposição da água na superfície do cátodo enquanto gera produtos químicos coagulantes (íons  $Al^{+3}$  ou  $Fe^{+3}$ , segundo o material anódico utilizado), hidrogênio gasoso ( $H_2$ ) e íons hidróxido ( $OH^-$ ) (GARCIA-SEGURA *et al.*, 2017).

Outra tecnologia utilizada será a flotação por ar dissolvido (FAD), e seu processo de funcionamento consiste na adesão de partículas do efluente junto as bolhas de ar geradas, sendo o conjunto formado por bolha-partícula carregado para a superfície do recipiente de flotação onde ocorre a recuperação das partículas (HAARHOFF; EDZWALD, 2012).

O presente trabalho teve como proposta inicial a junção dos processos do tratamento da EC com a FAD em um reator em batelada, buscando a maior eficiência na remoção da matéria orgânica do efluente e frigorífico de suíno, usando o Delineamento Composto Central (DCC) como ferramenta para avaliar os efeitos do tempo de eletrólise e densidade de corrente elétrica. Optou-se em executar o tratamento

eletroquímico e a FAD separadamente, sendo que esta última tecnologia será objeto de estudo da continuidade do projeto de pesquisa.

## 2 METODOLOGIA

O sistema de tratamento construído foi um reator de EC com fluxo de bateladas que leva eletrodos de alumínio, conectados a uma fonte de corrente elétrica contínua. O reator consiste em um tubo de PVC, com 100 mm de diâmetro, e outros três tubos de alumínio, com diâmetros de 75, 50 e 25 mm, e um cilindro maciço de alumínio com diâmetro de 10 mm, os tubos de alumínio com comprimento de 50 cm cada (figura 1). O efluente adentra na parte superior, onde será submetido a reações eletrolíticas, e saíra na parte inferior.

Na proposta inicial previa a utilização da FAD concomitante ao processo de EC, porém devido as dificuldades operacionais identificadas, optou-se por um sistema em que a EC seria seguida pela FAD, em um arranjo sequencial. O reator tem capacidade de receber 4 L de efluentes por batelada, com o efluente tratado por batelada sendo armazenado em frascos para realização das respectivas análises. O lodo gerado é encaminhado a uma saída na extremidade oposta a saída do efluente tratado, onde será descartado.

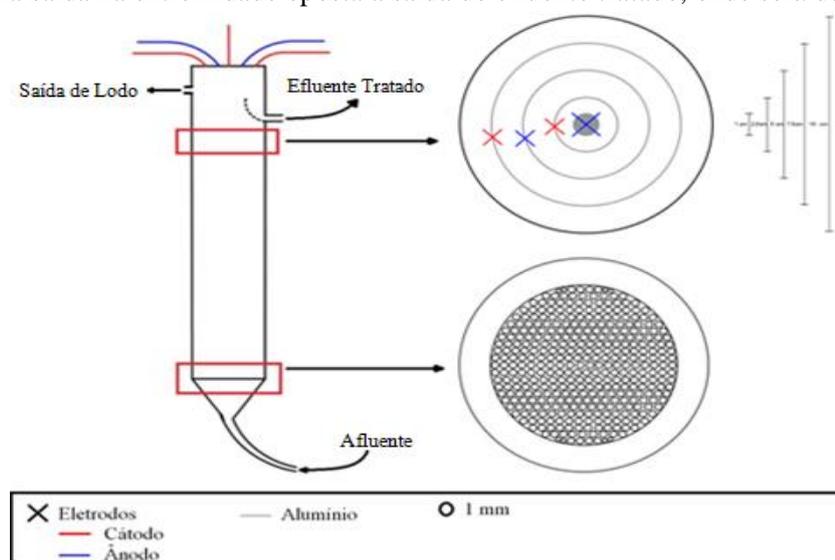


Figura 1. Demonstração do reator em escala laboratorial.

Fonte: Autoria Própria (2021)

Para embasar a otimização do sistema foi proposto a utilização do Delineamento Composto Central (DCC) que serve para permitir um melhor planejamento experimental dos ensaios para permitir dados mais fidedignos a partir de um embasamento estatístico para obtenção de um modelo do processo do sistema que possa proporcionar a otimização das variáveis estudadas. Neste planejamento experimental foram estudadas duas variáveis independentes (Densidade de corrente e Tempo de Detenção Hidráulica - TDH), com um fatorial completo de  $2^2$ , incluindo-se 3 repetições no ponto central, totalizando 7 ensaios com intuito de poder estudar o efeito da densidade de corrente ( $X_1$ ) e do TDH ( $X_2$ ) sobre o rendimento no tratamento de efluente de frigorífico de suínos. As variáveis respostas escolhidas no tratamento foram a remoção média de cor, DQO e turbidez para verificar a eficiência do tratamento do efluente em estudo.

Tabela 2. Matriz do delineamento experimental e valores reais das variáveis

Ensaio	Densidade de Corrente ( $X_1$ )	Densidade de Corrente ( $\text{mA.cm}^2$ )	TDH ( $X_2$ )	TDH (min)
1	-1	3	-1	5



2	+1	10	-1	15
3	-1	3	+1	5
4	+1	10	+1	15
5	0	6,5	0	10
6	0	6,5	0	10
7	0	6,5	0	10

Fonte: Autoria Própria (2021)

A Tabela 2 apresenta o número de ensaios com os valores codificados e demonstra os valores reais, definidos para testes preliminares com o efluente. Os testes preliminares foram determinados para achar as faixas de corrente e TDH ideal para iniciar os ensaios do DCC na EC e da FAD.

Os valores das variáveis respostas foram analisados pelo Software Protimiza em relação a modelagem empírica. A partir de cada modelo gerado vai ser possível avaliar sua validade por meio da análise de variância da ANOVA e se os efeitos são ou não significativos com intervalo de confiança de 95% e significância de  $p\text{-valor} < 0,05$ . Caso os modelos sejam válidos vai ser possível verificar pelos gráficos de superfície os pontos de uma região ótima para operação do sistema.

### 3 RESULTADOS

Para avaliar a eficiência da técnica na remoção de matéria orgânica (DQO), cor e turbidez, as amostras de efluente bruto utilizados para os testes foram caracterizados. Os resultados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3. Caracterização do efluente bruto.

Número Analise	DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	Turbidez (UNT)	Cor (UC)	pH	Condutividade elétrica (mS.cm <sup>-1</sup> )
1	13322,5	3170	3161	6,37	3,06
2	13597,5	2390	3543	6,39	3,26
3	12872,5	2610	3214	6,41	3,24
4	13247,5	2330	3016	6,39	3,29
5	14222,5	1810	3030	6,38	3,18
<b>Média ± Desvio Padrão</b>	<b>13452,5 ± 502,31</b>	<b>2462 ± 492,67</b>	<b>3192,8 ± 213,22</b>	<b>6,388 ± 0,0148</b>	<b>3,206 ± 0,0909</b>

Fonte: Autoria Própria (2021)

Analisando a tabela 4 é possível perceber que a eficiência de remoção da DQO, cor e turbidez foi semelhante na maioria dos ensaios. Nota-se claramente que o ensaio 2 realizado com uma densidade de corrente de 10 mA.cm<sup>2</sup> por 5 min, obteve o maior valor de remoção para DQO com 89%, e o ensaio 4 com densidade de 10 mA.cm<sup>2</sup> por 15 min obteve o maior valor de remoção para cor com 98,6%, e o ensaio 6 e 7 com densidade de 6,5 mA.cm<sup>2</sup> por 10 min obteve o maior valor de remoção para turbidez com 99,7%.

Tabela 4. Porcentagem de remoção das variáveis resposta.

Ensaio	Densidade de Corrente (mA.cm <sup>2</sup> )	TDH (min)	Remoção DQO (%)	Remoção Cor (%)	Remoção Turbidez (%)
1	3	5	82,79	76,76	95,50
2	10	5	89,03	97,26	99,44
3	3	15	83,98	96,79	99,65
4	10	15	84,11	98,62	99,52
5	6,5	10	83,86	96,09	99,68
6	6,5	10	83,79	96,29	99,70
7	6,5	10	84,10	96,38	99,71

Fonte: Autoria Própria (2021)

Por meio dos resultados obtidos foi possível avaliar se os modelos matemáticos gerados para remoção de turbidez, cor e DQO são válidos. Na tabela 5 está descrito os coeficientes do modelo de regressão, a partir da matriz de codificação e os termos lineares ajustados aos termos quadráticos. Os valores com p-valor inferior a 5% são considerados significativos.

Tabela 5: Coeficiente de regressão para remoção das variáveis respostas.

Parâmetros	Nome	Coefficiente	Erro Padrão	t calculado	p-valor
Turbidez	Media	99,04	0,33	297,27	0,0000
	X <sub>1</sub>	0,95	0,44	2,16	0,1194
	X <sub>2</sub>	1,06	0,44	2,40	0,0959
	X <sub>1</sub> .X <sub>2</sub>	-1,02	0,44	-2,31	0,1042
Cor	Media	94,04	1,11	84,64	0,0000
	X <sub>1</sub>	5,59	1,47	3,80	0,0319
	X <sub>2</sub>	5,34	1,47	3,63	0,0359
	X <sub>1</sub> .X <sub>2</sub>	-4,68	1,47	-3,18	0,0501
DQO	Media	84,53	0,31	275,15	0,0000
	X <sub>1</sub>	1,59	0,41	3,92	0,0296
	X <sub>2</sub>	-0,93	0,41	-2,29	0,1055
	X <sub>1</sub> .X <sub>2</sub>	-,153	0,41	-3,76	0,0329

X<sub>1</sub>-Densidade de corrente (mA.cm<sup>2</sup>); X<sub>2</sub>-Tempo de detenção hidráulica (min); \* termos significativos com p-valor < 0,05.

Fonte: Autoria Própria (2021)

Por meio dos resultados obtidos na tabela 5, podemos observar que as variáveis resposta para densidade de corrente (X<sub>1</sub>) e tempo de detenção hidráulica (X<sub>2</sub>) não foram significativas para modelo que corresponde a resposta de remoção da turbidez, para remoção de cor as duas variáveis foram significativas e para remoção de DQO a variável X<sub>1</sub> foi significativa enquanto que a variável X<sub>2</sub> não foi significativa. Já a interação das duas variáveis também não foi significativa para o modelo de turbidez, mas foram significativas para modelo que corresponde a resposta de remoção da cor e remoção de DQO.

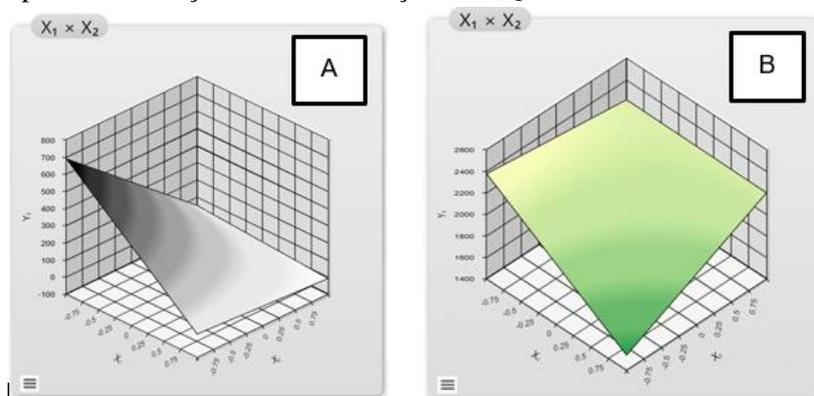


Figura 2. Gráfico de contorno e sua superfície resposta para remoção de Cor aparente e DQO.

Legenda: A. Gráfico de contorno de superfície resposta para remoção de cor, B. Gráfico de contorno de superfície resposta de remoção da DQO.

Fonte: Autoria Própria, (2021)

Podemos concluir na figura 2 no item A que os maiores valores de remoção da cor aparente podem ser obtidos aumentando a corrente aplicada e o tempo de hidrólise. Além disso, a área que possui melhores indicadores de remoção de cor está dentro da faixa de 9,125 a 10 mA.cm<sup>2</sup> para densidade de corrente e tempo de eletrólise de 13,75 a 15 minutos. A superfície de resposta mostrada na Figura 2 permite que a remoção da cor seja analisada de forma mais intuitiva, pois mostra os percentuais de remoção em três dimensões.



Já para DQO podemos observar na figura 2 no item B que a região com maior percentual de remoção encontra-se dentro da faixa de 9,125 a 10 mA.cm<sup>2</sup> de densidade de corrente elétrica e 13,75 e 15 minutos de reação de eletrólise. A representação em três dimensões do gráfico de contorno, conforme a Figura 2 mostra permite analisar a remoção da cor de maneira mais intuitiva.

#### 4 CONCLUSÃO

Com base em pesquisas na literatura, foram avaliados os parâmetros para estudo. Focando nos mais essenciais, foram selecionados os seguintes parâmetros para a pesquisa: pH inicial, tempo de detenção hidráulico e densidade de corrente elétrica.

Os resultados obtidos com os ensaios realizados indicam que o processo de EC pode ser usado para remoção de DQO, turbidez e cor aparente em efluentes de frigorífico de suínos, mostrando resultados eficientes para remoção de tais parâmetros, com todos os resultados mostrando uma eficiência maior a 80%.

Acredita-se que com a continuidade do presente projeto seja possível chegar ao equilíbrio entre um nível satisfatório de tratamento de efluente, sob condições operacionais mais brandas, em virtude da associação de duas tecnologias promissoras para o tratamento de efluentes.

#### REFERÊNCIAS

- AGUILAR, M.I.; SÁEZ, J.; LLORENS, M.; SOLER, A.; ORTUÑO, J.F. **Nutrient removal and sludge production in the coagulation–flocculation process.** Water research. v.36, p.2910-2919. 2002.
- BORJA, R.; BANKS, C.J.; WANG, Z. **Effect of organic loading rate on anaerobic treatment of slaughterhouse wastewater in a fluidised-bed reactor.** Bioresource Technology. v.52, p.157-162. 1995.
- BUSTILLO-LECOMPTE, C. F.; MEHRVAR, M. **Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry: A review on trends and advances.** Journal of Environmental Management. n. 161, p. 287 – 302, 2015.
- BUSTILLO-LECOMPTE, C.F.; MEHRVAR, M.; QUIÑONES-BOLAÑOS, E. **Cost-effectiveness analysis of TOC removal from slaughterhouse wastewater using combined anaerobic-aerobic and UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> processes.** Journal of Environmental Management. v.134, p.145-152, 2014.
- CAIXETA, C.E.T.; CAMMAROTA, M.C.; XAVIER, A.M.F. **Slaughterhouse wastewater treatment: evaluation of a new three-phase separation system in a UASB reactor.** Bioresource Technology. v.81, p.61-69. 2002.
- GARCIA-SEGURA, S. et al. **Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies.** Journal of Electroanalytical Chemistry. v. 801, p. 267-299, 2017.
- GIL, A.S.L. **CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DE ETE DE ABATEDOURO VISANDO O REÚSO.** Trabalho de Conclusão de Curso Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brasil, 2010.
- HAARHOFF, J.; EDZWALD, J. K. **Adapting dissolved air from flotation by clarifying sea water cation.** Desalination. n.311, p.90-94, 2012. 90 – 94.
- MENESES, J.M. et al. **Tratamento do efluente do biodiesel utilizando a eletrocoagulação/flotação: Investigação dos parâmetros operacionais.** *Quím. Nova* [online]. 2012, vol.35, n.2, pp.235-240. ISSN 0100-4042.
- MORALES, M. M. et al. **Avaliação dos resíduos líquidos em um sistema de abate de bovinos.** Estudos de Biologia, v. 31, n. 73/75, p. 111–115, 2009.
- VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3. Ed. DESA, UFMG: Belo Horizonte, 2005.