

## ELETROCOAGULAÇÃO-FLOTAÇÃO: UMA TECNOLOGIA MAIS SUSTENTÁVEL PARA TRATAMENTO DE EFLUENTES DE FRIGORÍFICOS DE SUÍNOS

Jair Juarez João<sup>1</sup>

Adilson Vieira Alves<sup>2</sup>

José Luiz Vieira<sup>3</sup>

Tuane Emerick<sup>4</sup>

Cintia Souza Silva<sup>5</sup>

**RESUMO:** A atividade da suinocultura representa um exemplo de geração de efluentes líquidos contaminados por substâncias agressivas ao meio ambiente. Este setor está associado à produção de grandes volumes de efluentes, que apresentam altas cargas de contaminantes, forte coloração e odor desagradável. Além disso, este tipo de efluente tem uma característica que confere à água elevadas concentrações de carbono orgânico, nitrogênio, fósforo e coliformes fecais. Estes tipos de efluentes geralmente são tratados por processos biológicos convencionais, que muitas vezes não são eficientes. Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência do processo de eletrocoagulação-flotação (ECF), no tratamento de efluentes gerados pelos frigoríficos de suínos, de modo a otimizar os parâmetros operacionais do sistema. Para atingir este objetivo foram coletadas mensalmente, por um período de um ano, amostras na entrada da estação de tratamento de efluentes de um frigorífico. Os efluentes coletados foram submetidos aos ensaios laboratoriais de ECF, utilizando um reator eletroquímico com eletrodo de alumínio, variando o tempo de exposição (0-60 min), corrente (1 a 5 A) e o potencial elétrico do reator (0 a 24 V). Os resultados obtidos mostraram que o processo de eletrocoagulação-flotação é eficiente para remoção dos contaminantes existentes no efluente bruto da linha vermelha do abate de suínos. A eficiência média na remoção dos contaminantes

---

<sup>1</sup> Doutor em Química pela UFSC. Docente no Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais na Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL, Tubarão (SC), Brasil. E-mail: jair.joao@unisul.br

<sup>2</sup> Graduando em Química Industrial pela Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL, Tubarão (SC), Brasil.

<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Química pela Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL, Tubarão (SC), Brasil.

<sup>4</sup> Mestranda no Programa de *Stricto Sensu* em Ciências Ambientais na Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL, Tubarão (SC), Brasil.

<sup>5</sup> Mestranda no Programa de *Stricto Sensu* em Ciências Ambientais na Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL, Tubarão (SC), Brasil.

---

foi bastante expressiva. Para a turbidez ocorreu uma redução média de 97%; cor de 94%; DQO de 89%; DBO5 de 90%; fósforo de 88,5%; nitrogênio de 88%; e óleos e graxas de 58%.

**PALAVRAS-CHAVE:** Águas residuais; Frigoríficos; Processos eletroquímicos; Suinocultura; Sustentabilidade.

## **ELECTROCOAGULATION-FLOTATION: A MORE SUSTAINABLE TECHNOLOGY FOR THE TREATMENT OF SWINE SLAUGHTERHOUSE EFFLUENT**

**ABSTRACT:** Swine breeding generates liquid effluents contaminated by aggressive substances in the environment. The sector is associated with great effluent production that provides high loads of contaminants, strong colors and disagreeable smell. Effluent is characterized by water with high concentrations of organic carbon, nitrogen, phosphorus and fecal coliforms. These effluents are generally treated by conventional biological processes which are frequently inefficient. Current assay evaluates the efficiency of the electro-coagulation-floitation process (EFC) in the treatment of effluents generated by swine abattoirs to improve the system's operational parameters. For one year, samples were collected monthly at the entrance of the treatment station of abattoir effluents. Effluents underwent ECF lab assays with an electrochemical reactor coupled to aluminum electrode, with a variety of time exposure (0-60 min), current (1 - 5 A) and the reactor's electric capacity (0 - 24 V). Result show that the electrocoagulation-floitation process is efficient to remove contaminants in the crude effluent of the red line of swine abattoir. Mean efficiency in the removal of contaminants was significant. A mean 97% reduction in turbidity occurred; 94% in color; 89% in DQO; 90% in BOD; 88.5% in phosphorus; 88% in nitrogen; 58% in oils and fatty acids.

**KEY WORDS:** Abattoirs; Electrochemical processes; Residual waters; Sustainability; Swine breeding.

## **INTRODUÇÃO**

O Brasil é o quarto maior produtor e exportador de carne suína do mundo e de acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), a tendência é que até 2019 haja um incremento de 4,9% na produção. Atualmente,

Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Paraná são os três maiores produtores nacionais de carne suína e, com o aquecimento do mercado, a tendência é que haja um crescimento na produção em outras regiões (SEBRAE, 2016).

Os abates dos animais (suínos) para fins comerciais necessitam de lugares adequados e seguros do ponto vista sanitário, pois além da carne, são produzidos insumos no processo, como ossos, vísceras, sangue, couros, gorduras etc. que precisam ser lavados de forma adequada (HE *et al.*, 2016). Além disso, o aumento na produção vai provocar um crescimento exponencial e preocupante na concentração de alguns contaminantes nos efluentes gerados como matéria orgânica, fósforo e amônia (LOU *et al.*, 2018).

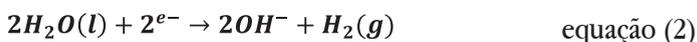
Os frigoríficos geram grande quantidade de efluentes que apresentam alta carga de matéria orgânica e elevados teores de gorduras e sólidos. O abate de cada suíno consome em média 1200 litros de água por cabeça, sendo 300 litros na sala de matança; 400 litros nas demais dependências; 500 litros nos anexos externos (SCARASSATI *et al.*, 2003). Assim, os efluentes gerados no processo de abate, limpeza e lavação precisam ser adequadamente tratados antes do descarte (LIN *et al.*, 2018).

A atividade da suinocultura (frigoríficos de suínos) representa um exemplo de geração de efluentes líquidos altamente contaminados por sólidos insolúveis (AFONSO; BÓRQUEZ, 2002). Além disso, apresentam altos teores de matéria orgânica dissolvida, conferindo à água elevadas concentrações de carbono orgânico, nitrogênio e coliformes fecais, que são os principais contaminantes presentes neste tipo de efluente (TANG *et al.*, 2018). Neste contexto, a proposta de sistema de tratamento biológico se apresenta como uma alternativa conveniente devido à biodegradabilidade dos compostos presentes na matriz aquosa (WAKI *et al.*, 2018). A principal vantagem destes processos é a dispensa de aporte energético. Entretanto, possuem como desvantagem a impossibilidade de um único sistema produzir efluentes que atendam aos padrões ambientais desejados, sendo necessário associar a um processo coadjuvante para que sejam obtidos efluentes com características adequadas para descarte, e que não agridam o meio ambiente, especialmente os corpos hídricos receptores (CHEN *et al.*, 2015).

Diferentes metodologias são descritas na literatura que podem ser utilizadas como coadjuvantes para tratamento dos efluentes líquidos gerados na atividade da suinocultura. Uma alternativa promissora que pode ser associada ao tratamento

biológico é a utilização de processos eletroquímicos para a transformação total das moléculas orgânicas em gás carbônico e água (EMAMJOMEH; SIVAKUMAR, 2009).

A eletrocoagulação-flotação (ECF) é uma técnica eletroquímica de tratamento de efluentes líquidos que utiliza eletrodos de sacrifício para a geração *in situ* de um agente coagulante (CRESPILHO *et al.*, 2004; AN *et al.*, 2017). Simultaneamente, ocorre eletrólise da água com formação de microbolhas de gases que ajudam na flotação dos sistemas coloidais que coagulam pela desestabilização das cargas de suas superfícies (KHORRAM; FALLAH, 2018). Durante a eletrocoagulação-flotação, as reações químicas mais importantes envolvem a dissolução de cations metálicos no ânodo e a formação de íons hidroxila e gás hidrogênio no cátodo, conforme apresentado abaixo nas equações 1 e 2 (SEGURA; OCON; CHONG, 2018):



O processo eletroquímico de ECF pode ser um método promissor no processo de reciclagem da água contaminada com alto teor de matéria orgânica, uma vez que combina a oxidação parcial do poluente por via eletrolítica com a precipitação físico-química ou eletroquímica do lodo (MOUSSA *et al.*, 2017).

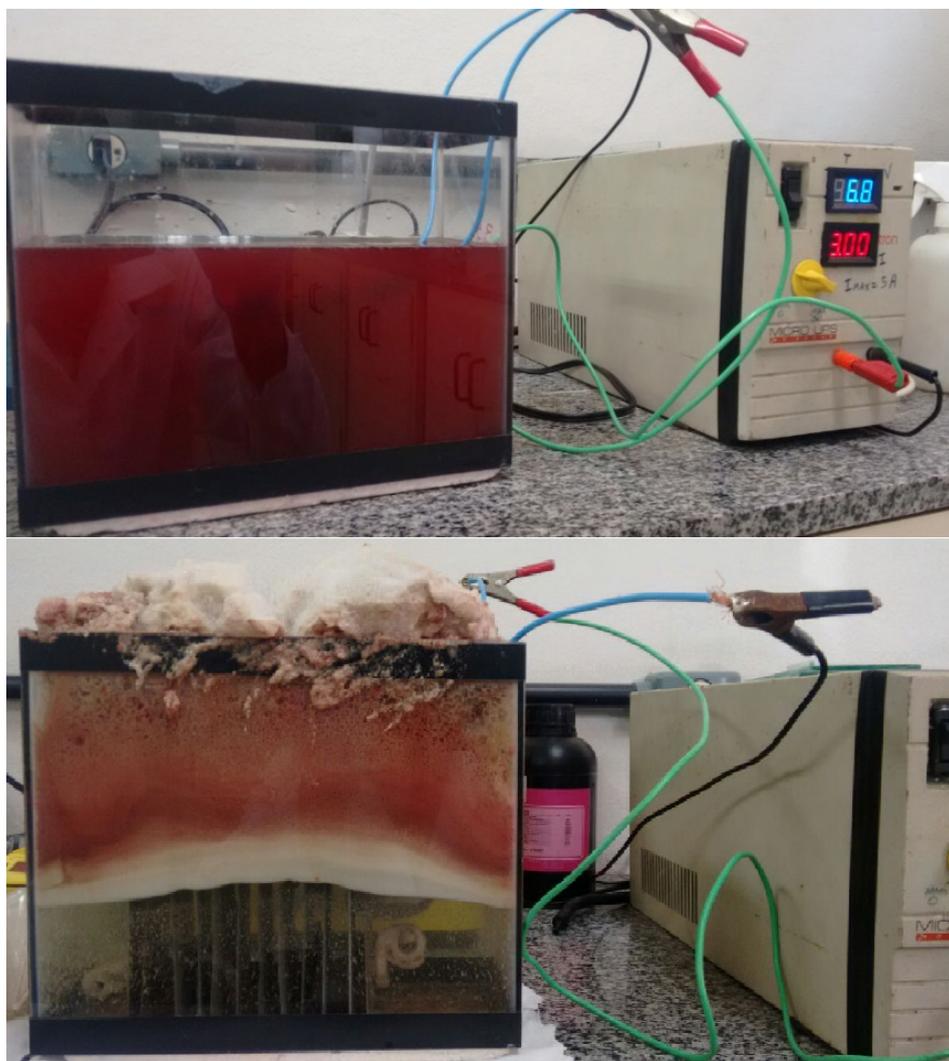
Embora o processo eletroquímico seja uma tecnologia em evolução, que está sendo efetivamente aplicada hoje para o tratamento de efluentes, a escassez de conhecimento científico ainda é incipiente, especialmente para efluentes que apresentam elevadas cargas de matéria orgânica, como os gerados nos frigoríficos de suínos. Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência do processo eletroquímico de eletrocoagulação-flotação no tratamento de efluentes da linha vermelha, gerados nos frigoríficos de suínos, de modo a aperfeiçoar os parâmetros operacionais do sistema.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

As amostras foram coletadas mensalmente, por um período de um ano, na entrada da estação de tratamento de efluentes de um frigorífico de abate de suínos, localizado no Sul do Estado de Santa Catarina (Brasil). As coletas foram feitas na linha vermelha, de acordo com os procedimentos adotados pela ABNT NBR 9897:1987 “Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores” e ABNT NBR 9898:1987 “Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores”.

Os efluentes da linha vermelha são gerados desde o abate até os processos subsequentes como: sangria, esfolagem, escaldamento, evisceração, limpeza e lavagem das carcaças, processamento de vísceras, câmaras frias, corte e desossa; áreas com presença significativa de sangue e graxaria.

Para a realização dos experimentos, foi utilizado um reator de acrílico com 30 cm de comprimento, 20 cm de altura e 15 cm largura. Dentro do reator foram colocadas as células eletrolíticas, formadas por 12 placas de alumínio (15 x 10 cm) com 1 mm de espessura, espaçadas 1 cm uma da outra, formando uma área superficial total do conjunto de placas de 1800 cm<sup>2</sup>, sendo a área de cada eletrodo (cátodo e ânodo) de 900 cm<sup>2</sup>. O conjunto formado possui 2 coletores distribuidores da energia elétrica, um alimentado com carga elétrica positiva (+) e outro com negativa (-), arrançados de forma que cada placa tivesse como vizinha outra placa com carga elétrica oposta, formando um circuito em paralelo (Figura 1).



**Figura 1.** Representação do sistema do tratamento eletroquímico por ECF.

Foi utilizada uma fonte retificadora com potência aparente de 180 W, marca *Metron*, modelo M-60, com controle de potencial terminal através de um circuito eletrônico chaveado por transistores. O controle do potencial elétrico foi efetuado manualmente através de um potenciômetro, com intervalo de operação de 0 a 24 V. A fonte possui 1 amperímetro e 1 voltímetro utilizados para visualização dos parâmetros de controle.

Para realização dos ensaios, primeiramente, foi fixado um valor para o potencial elétrico aplicado às placas. Isso foi feito através da observação da quantidade de bolhas de gases geradas pela eletrólise para um determinado potencial. Durante esta fase, observou-se a limitação elétrica da fonte retificadora, para evitar o curto-circuito nos componentes eletrônicos da fonte.

Após o potencial elétrico ter sido determinado, o tempo necessário para que o efluente fosse totalmente clarificado foi avaliado. No decorrer dessa etapa foram feitos ensaios cinéticos para remoção da cor, conforme descrito abaixo.

## 2.1 ENSAIOS CINÉTICOS

A determinação da cinética de ECF para avaliação da cor, turbidez e pH, foi realizada utilizando 3,5 L do efluente bruto, corrente de 3 A, potencial elétrico de 7,5 V e distância entre as placas de 1 cm. Alíquotas foram retiradas do reator eletroquímico em intervalos de 5 minutos até completar 60 minutos, onde foram analisados os parâmetros cor, turbidez e pH. Os dados obtidos possibilitaram a construção da curva cinética e, conseqüentemente, a determinação do tempo de equilíbrio. Durante todos os ensaios, a cada 5 minutos foi feita a inversão de polaridade dos eletrodos, com o intuito de prevenir a formação de filme passivo.

## 2.2 ENSAIOS DE TRATABILIDADE DO EFLUENTE

Os ensaios de ECF foram conduzidos em laboratório, utilizando 3,5 L do efluente bruto, inicialmente homogeneizado, variando o tempo de exposição (0-60 min), corrente (1 a 5 A) e o potencial elétrico do reator (0 a 24 V). Em correntes abaixo de 1 A não foram observadas bolhas suficientes para ocorrer a eletrocoagulação-flotação das partículas, e em correntes acima de 5 A ocorre passivação do eletrodo.

Durante a realização dos experimentos de ECF o sistema não foi homogeneizado, apenas ocorreu a mistura natural através da formação e purga de bolhas de gases formados durante o processo eletroquímico.

A avaliação da eficiência do sistema foi realizada através das análises físico-químicas do efluente bruto e tratado. O monitoramento dos parâmetros e a duração

dos experimentos foram feitos de acordo com o estudo cinético previamente realizado para avaliação do pH, cor e turbidez.

A melhor condição de tratamento foi selecionada e avaliada por meio de ensaios de cor (uC) e turbidez (uT), utilizando um espectrofotômetro modelo *Spectroquant PHARO 300 (MERCK)*. Outros parâmetros também foram analisados, tais como: pH, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio medida a 5 dias (DBO5), óleos e graxas, nitrogênio, fósforo e sólidos suspensos. Todas as determinações foram realizadas em triplicata.

### 2.3 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

As análises físico-químicas para o efluente bruto e tratado foram realizadas de acordo com os procedimentos do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 22 Edition* (APHA, 2012).

A determinação de nitrogênio proteico foi realizada através da precipitação das proteínas com ácido tricloroacético (TCA) a 10% (TSHINYANGU; HENNEBERT, 1996). Os teores de nitrogênio do precipitado e do sobrenadante resultante foram analisados pelo método de Kjeldahl.

### 2.4 ANÁLISE DO LODO

O lodo gerado foi caracterizado de acordo com os critérios de classificação de resíduos sólidos da NBR 10004/2004. Os parâmetros analisados foram pH, DQO, alumínio, matéria orgânica, sólidos totais, cinzas, reatividade e inflamabilidade. Os procedimentos foram executados de acordo com *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 22 Edition* (APHA, 2012).

### 2.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Todas as análises foram conduzidas em triplicata e os dados expressos como média  $\pm$  desvio padrão (DP). Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), ao nível de 5% de significância com nível de confiança igual a 95%, seguido

pelo teste de Tukey, para comparação das médias. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o *software* STATISTICA 7.0.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente o efluente bruto da linha vermelha foi coletado na entrada da estação de tratamento de efluentes de um frigorífico, e foi feita a caracterização química através das análises de nitrogênio proteico, nitrogênio não proteico, nitrogênio total, proteína bruta, matéria orgânica total, sólidos totais, fósforo e lipídios. Estes dados foram utilizados para fazer a avaliação da composição química em termos de nitrogênio (N), fósforo (P) e carbono (C) para efluente bruto, conforme mostrado na Tabela 1.

**Tabela 1.** Resultados da caracterização química do efluente bruto da linha vermelha

Parâmetros analisados	Resultados obtidos
Nitrogênio proteico (mg L <sup>-1</sup> )	116,7 ± 3,6
Nitrogênio não proteico (mg L <sup>-1</sup> )	10,2 ± 1,2
Nitrogênio total (mg L <sup>-1</sup> )	126,9 ± 6,4
Proteína bruta (mg L <sup>-1</sup> )	787,5 ± 12,6
Matéria orgânica total (mg L <sup>-1</sup> )	2440 ± 86
Sólidos totais (mg L <sup>-1</sup> )	1114,6 ± 48,2
Lipídios (mg L <sup>-1</sup> )	64,7 ± 16
Fósforo (mg L <sup>-1</sup> )	38,3 ± 2,8

Os resultados mostraram que o efluente bruto apresenta concentrações significativas de nitrogênio proteico (87,5 mg L<sup>-1</sup>), proteína bruta (787,37 mg L<sup>-1</sup>), matéria orgânica total (2440 mg L<sup>-1</sup>), lipídios (64,7 mg L<sup>-1</sup>) e fósforo (38,3 mg L<sup>-1</sup>). De acordo com os resultados obtidos, os efluentes gerados nos frigoríficos podem ser classificados como agentes de poluição das águas, caso não sejam tratados de forma adequada, podendo ser uma ameaça à saúde pública. Muitos frigoríficos lançam seus efluentes gerados diretamente nos cursos d'água sem qualquer tipo de tratamento preliminar, que dependendo da capacidade de diluição do corpo hídrico

receptor, podem tornar as águas impróprias à vida aquática e a qualquer tipo de abastecimento, agrícola, comercial, industrial, recreativo, etc.

As análises físico-químicas, correlacionando os resultados obtidos para efluente bruto e tratado, serão mostradas na Tabela 3.

### 3.1 OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE TRATABILIDADE

Com o intuito de fazer a otimização do método aplicado, foram realizados experimentos eletroquímicos de eletrocoagulação-flotação, utilizando diferentes correntes eletroquímicas, 1, 3 e 5 A. As características qualitativas para água residual bruta e tratada foram avaliadas por meio de análises de pH, cor, turbidez e DQO, conforme apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Resultados obtidos para água residual bruta e tratada utilizando diferentes correntes eletroquímicas, 1, 3 e 5 A

Amostra	pH	Cor (Hz)	Turbidez (FAU)	DQO (mg L <sup>-1</sup> )
Bruta	7,45 ± 0,1 <sup>b</sup>	235 ± 20 <sup>c</sup>	122,8 ± 14 <sup>c</sup>	2466 ± 122 <sup>c</sup>
1 A	8,39 ± 0,1 <sup>c</sup>	50,1 ± 6,2 <sup>b</sup>	27,2 ± 5,2 <sup>b</sup>	1882 ± 529 <sup>b</sup>
3 A	9,74 ± 0,1 <sup>a</sup>	5,1 ± 0,4 <sup>a</sup>	2,0 ± 0,2 <sup>a</sup>	292,5 ± 14 <sup>a</sup>
5 A	9,75 ± 0,1 <sup>a</sup>	5,0 ± 0,3 <sup>a</sup>	4,0 ± 2,1 <sup>a</sup>	304 ± 19 <sup>a</sup>

De acordo com resultados apresentados na Tabela 2, para corrente de 1 A não foi observado um bom desempenho do processo, especialmente para remoção da matéria orgânica total (DQO), com remoção média de 24%. Os baixos valores para remoção da DQO (matéria orgânica) podem estar relacionados com hidrólise do eletrodo de alumínio, que depende diretamente do potencial eletroquímico aplicado. Entretanto, quando o sistema foi submetido a corrente de 3 e ou 5 A os resultados foram promissores.

Com os resultados obtidos, utilizando diferentes correntes, foi aplicado o teste de Tukey. O teste de Tukey demonstra claramente que o aumento da corrente de 1 A para 3 A favoreceu o tratamento proposto, independentemente dos parâmetros

analisados (cor, turbidez e DQO). Entretanto, quando o efluente foi tratado com corrente de 5 A não foram observadas diferenças significativas para os resultados de cor ( $5,0 \text{ mg L}^{-1}$ ), turbidez ( $4,0 \text{ mg L}^{-1}$ ) e DQO ( $304 \text{ mg L}^{-1}$ ), quando comparados com os resultados obtidos para corrente de 3 A, cor ( $5,1 \text{ mg L}^{-1}$ ), turbidez ( $2,0 \text{ mg L}^{-1}$ ) e DQO ( $292,5 \text{ mg L}^{-1}$ ). Estas pequenas diferenças observadas nos resultados (correntes 3 e 5 A) estão relacionadas com as reações que ocorrem no equilíbrio, como a hidrólise do eletrodo de alumínio e formação de outros hidróxidos insolúveis, corroborando para passivação do eletrodo em correntes mais elevadas (5 A). É importante ressaltar que a corrente desempenha papel fundamental no tamanho e na quantidade de bolhas de gás formadas no processo de eletrocoagulação-flotação. Existe uma proporcionalidade entre a corrente e a quantidade de bolhas formadas no processo. Em correntes mais baixas (1 A) não foram observadas bolhas suficientes para a flotação das partículas, e em correntes mais elevadas (acima de 5 A) não foi perceptível aumento expressivo na formação de bolhas.

Assim, em função do menor consumo de energia e desgaste do eletrodo, os experimentos foram otimizados com corrente de 3 A, potencial elétrico 7,5 V e distância entre as placas de 1 cm. Nestas condições foi observada geração expressiva de bolhas de ar no sistema, com redução de 97,8% para cor, 98,3% para turbidez e 72,5% para DQO. Resultados semelhantes foram observados para corrente de 5 A. Entretanto, a utilização da corrente de 5 A implicaria um maior consumo de energia e maior desgaste e passivação do eletrodo.

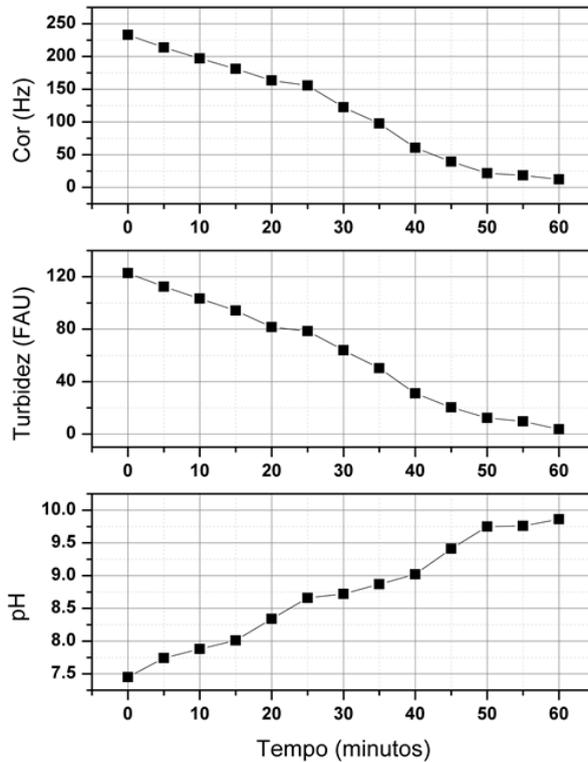
### 3.2 CINÉTICA PRA REMOÇÃO DA COR E TURBIDEZ

Após a definição das melhores condições de tratabilidade, as amostras foram submetidas às análises cinéticas para avaliação dos parâmetros cor, turbidez e pH. É importante ressaltar que cor e a turbidez nos efluentes estão relacionadas, principalmente, por substâncias formadas pela decomposição e suspensão da matéria orgânica.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 2, observa-se que nos períodos iniciais, entre 0 a 20 minutos, ocorreu a menor remoção para cor e turbidez, 30 e 33%, respectivamente. Na fase inicial da eletrofloculação-flotação ocorre o

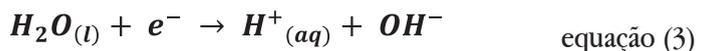
consumo de  $H^+$ , mas essa reação fica limitada pela difusão e, em decorrência do aumento do potencial aplicado, as moléculas de água próximas ao eletrodo são eletrolisadas. Inicialmente ocorre a redução do hidrogênio na água que se adsorve no eletrodo. Entretanto, entre 20 a 30 minutos, observa-se que o processo sofre pequenas alterações. Após essa etapa, a reação de oxidação do eletrodo continua, sendo que o tempo de equilíbrio foi atingido em torno de 60 minutos, neste o efluente ficou totalmente clarificado, com remoção média de 95% para cor e 97% para turbidez, independentemente da amostra analisada. Estudos vêm mostrando que o processo de eletrocoagulação-flotação assistida com sonda de ultrassom e aeração pode diminuir o tempo de equilíbrio (DIZGEA *et al.*, 2018; KUMAR *et al.*, 2018).

Os desvios apresentados nos pontos iniciais da curva são devidos à grande variabilidade do efluente bruto coletado (3 amostras). Todavia, o sistema de tratamento de ECF demonstrou ser eficiente para tratamento de efluentes de frigoríficos de suínos, pois apesar de uma pequena variabilidade inicial, ocorreu uma redução expressiva nos parâmetros cinéticos estudados (cor e turbidez).

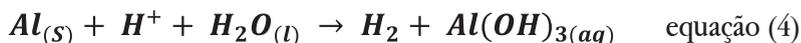


**Figura 2.** Cinética de variação da remoção da cor, turbidez e pH do efluente bruto de um frigorífico, corrente 3 A (média de três experimentos).

Também foi observado o aumento do pH do meio durante o processo de ECF, o qual se estabiliza entre 9 a 10. O aumento do pH é um comportamento esperado durante o tratamento de efluentes utilizando ECF, pois ocorre a redução do hidrogênio no cátodo provocando a hidrólise do metal (alumínio) com formação de hidróxido metálico. Geralmente as reações participantes deste equilíbrio são: hidrólise do alumínio, liberação de  $\text{CO}_2$ , formação de oxigênio no ânodo e formação de outros hidróxidos insolúveis. Inicialmente ocorre a redução do hidrogênio na água que se adsorve no eletrodo, conforme pode ser observado nas equações 3 e 4.



Em seguida, ocorre a formação de H<sub>2</sub>:



Após essa etapa, a reação de passivação continua até a formação dos óxidos e nos instantes finais do processo (50 a 60 min), na qual se observa a estabilização do pH. O equilíbrio do pH pode estar relacionado com a capacidade tamponante do tratamento eletroquímico, a qual está associada ao balanço entre a produção e o consumo de OH<sup>-</sup>, estabilizando assim o pH. Estes resultados corroboram com estudos realizados para remoção de substâncias húmicas de águas residuais (KOPARAL *et al.*, 2008), e com estudos do tratamento de águas residuais de lavagem do solo contaminadas por fluídos de perfuração de poços de petróleo (MOTA *et al.*, 2015). Outros resultados interessantes são reportados em uma revisão sobre as abordagens de modelagem do processo de eletrocoagulação no tratamento de água/ efluentes (HAKIZIMANA *et al.*, 2017).

### 3.3 TRATABILIDADE DO EFLUENTE - ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

É importante ressaltar que a indústria frigorífica de suíno representa um grande problema ambiental, responsável por gerar grandes quantidades de resíduos sólidos e efluentes líquidos ao longo do processo produtivo, através da higienização de pisos, currais, pocilgas, corredores, caminhões e animais. As principais características neste tipo de efluente são: teor de gordura elevado e altos teores de nitrogênio, fósforo, sais, DQO e DBO. Os efluentes brutos foram caracterizados através de análises físico-químicas e, posteriormente, realizados os ensaios de tratabilidade por ECF, com corrente de 3 A. A eficiência do processo foi avaliada através das análises de pH, cor, turbidez, fósforo, nitrogênio, óleos de graxas, alumínio, DQO e DBO<sub>5</sub>. Todas as determinações foram realizadas em triplicata.

A média dos resultados obtidos para o efluente bruto e tratado, e os valores estabelecidos pela legislação brasileira, são mostrados na Tabela 3.

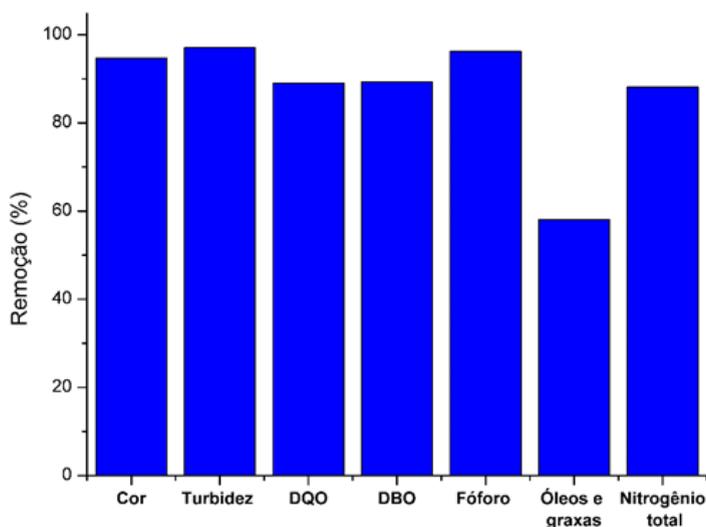
**Tabela 3.** Média dos resultados obtidos para o efluente bruto e tratado por eletrocoagulação-flotação com corrente de 3 A

Parâmetros	Efluente Bruto	Efluente Tratado	LEGISLAÇÃO <sup>a</sup>
pH	7,4 ± 0,2	9,8 ± 0,5	5 a 9
Cor (Hz)	233 ± 14	12,3 ± 2,1	-
Turbidez (FAU)	122 ± 6,5	3,6 ± 1,2	-
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	2240 ± 52	245,8 ± 8,4	-
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	600 ± 24	64,3 ± 7	Remoção de 60%
Fósforo (mg L <sup>-1</sup> )	38,3 ± 1,6	1,46 ± 0,3	-
Nitrogênio total (mg L <sup>-1</sup> )	138,9 ± 12,4	16,5 ± 2,0	-
Óleos e Graxas (mg L <sup>-1</sup> )	64,8 ± 16	27 ± 4	50 mg L <sup>-1</sup>
Alumínio (mg L <sup>-1</sup> )	N.D.	9,8	-

<sup>a</sup>CONAMA n° 430/2011.

De acordo com os resultados das análises, podemos observar que ocorreu uma redução significativa na cor, turbidez, fósforo, nitrogênio, óleos de graxas, DQO e DBO<sub>5</sub>, independentemente da coleta. Isso mostra que o tratamento eletroquímico via ECF é eficiente.

De modo geral, todos os parâmetros analisados apresentaram uma eficiência média acima de 90% na remoção dos contaminantes, cor (94%), turbidez (97%), DQO (89%), fósforo (96%), DBO<sub>5</sub> (90%) e nitrogênio (88%). Entretanto, para óleos e graxas os valores foram inferiores, 58% (Figura 3).



**Figura 3.** Eficiência de remoção dos contaminantes do efluente de frigorífico de suíno utilizando ECF, corrente de 3 A, tempo de 60 minutos.

A baixa eficiência na remoção de óleos e graxas pode ser devido a dificuldades dos óleos interagirem com a espécie coagulante do meio (hidróxido de alumínio), dificultando assim a coagulação e a flotação dessas moléculas. Foi observado também um aumento no teor de alumínio ( $9,8 \text{ mg.L}^{-1}$ ) no efluente tratado. Este fato ocorre em função do desgaste do eletrodo durante o processo eletroquímico, o que provoca migração de alumínio do eletrodo para o efluente. É importante ressaltar que a legislação brasileira não estabelece limites para alumínio em efluentes (BRASIL, 2011).

Resultados semelhantes foram observados quando o processo de eletrocoagulação-flotação foi utilizado para remoção de matéria orgânica (DQO e DBO5), nitrato ( $\text{NO}_3$ ), nitrogênio (N), fosfato (P) e coliformes fecais (FC) em efluentes urbanos (ELAZZOUZI; HABOUBI; ELYOUBI, 2017).

Os resultados também demonstraram que eletroflocoagulação-flotação se apresenta como uma tecnologia mais sustentável e superior às demais tecnologias tradicionais para tratamento de efluentes com elevada concentração de matéria orgânica. Este fato pode ser atribuído às características de conjugar efeitos complementares das reações de oxidação-redução, coagulação-floculação, com a

ação conjunta das micro-bolhas formadas durante processo eletroquímico. Estas características não são observadas quando metodologias tradicionais são utilizadas para tratamento de efluentes com estas características, como, por exemplo, o tratamento biológico (DUDA, 2011).

Com a utilização da técnica de eletrofloculação-flotação será possível propor projetos de acordo com cada processo produtivo, e que sejam capazes de diminuir a quantidade de subprodutos gerados, tais como lodo e substâncias químicas agressivas ao meio ambiente.

Além disso, o processo de eletrocoagulação-flotação apresenta algumas vantagens significativas, como menor tempo de retenção, equipamentos simples e de fácil operação, não utiliza produtos químicos, flocos formados são mais estáveis, segurança, versatilidade, reações rápidas e sistemas em tamanho menor do que os sistemas tradicionais. É importante ressaltar que o tempo médio de retenção para tratamento biológico convencional com lodo ativado, UASB floculento, é de 430 minutos (DUDA, 2011); com filtro biológico, 720 minutos (CAMPOS *et al.*, 1999); e com leito fluidizado, 432 minutos (BORJA *et al.*, 1995).

A quantidade de lodo produzido também é menor quando comparado com os processos convencionais. Nas condições estudadas, a quantidade de lodo seco foi de  $0,80 \pm 0,1$  kg por  $m^3$  de água de efluente tratado. Este valor corresponde menos 10% do lodo total produzido por processos convencionais. Entretanto, a concentração de alumínio residual no lodo seco foi de 18,8%. Outros resultados são apresentados na Tabela 4: matéria orgânica 52,4%, cinzas 45,50% e proteína bruta  $169,1 \text{ mg kg}^{-1}$ .

**Tabela 4.** Caracterização do lodo seco formado no processo de eletrocoagulação-flotação do efluente de frigorífico de suínos

Parâmetros analisados	Resultados obtidos
Matéria orgânica total (%)	$52,4 \pm 4,7$
Cinzas (%)	$45,5 \pm 2,5$
Nitrogênio total ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	$39,6 \pm 3,2$
Proteína bruta ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	$247,6 \pm 8,5$

É importante ressaltar que existem poucos trabalhos na literatura sobre a caracterização do lodo gerado no processo de tratamento de água residual por

ECF. No entanto, de acordo com os critérios de classificação de resíduos sólidos da NBR 10004/2004, o lodo desidratado (seco) é um resíduo não perigoso, classe II. O lodo desidratado foi incinerado em forno Mufla a 450 °C e os resultados mostraram que as cinzas geradas podem ser misturadas com o barro para fazer tijolos e/ou cerâmicas comerciais em função dos aluminossilicatos presentes no lodo. As argilas têm em sua composição química: alumina, sílica, óxidos de ferro, magnésio, calcário, componentes esses que aumentam a resistência ao calor e melhoram a resistência à compressão (JOÃO *et al.*, 2018).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo eletroquímico de eletrocoagulação-flotação vem se tornando uma alternativa promissora para tratamento de efluente e reciclagem de águas contaminadas. Através dos resultados obtidos com o presente estudo, foi observado que nas condições estudadas o processo de eletrocoagulação-flotação mostrou eficiência para remoção dos contaminantes do efluente bruto da linha vermelha de uma indústria frigorífica de abate de suínos.

A eficiência média na remoção dos contaminantes foi bastante expressiva. Para a turbidez ocorreu uma redução média de 97%; cor de 94%; DQO de 89%; DBO5 de 90%; fósforo de 88,5%; nitrogênio de 88%; e óleos e graxas de 58%. A baixa eficiência na remoção de óleos e graxas foi devido a dificuldades do óleo interagir com a espécie coagulante do meio (hidróxido de alumínio), dificultando assim a coagulação e a flotação dessas moléculas. Analisando os valores das concentrações do efluente tratado, verifica-se que este atende aos valores máximos permitidos pela legislação ambiental brasileira.

Além disso, estudos futuros serão realizados com a diminuição da distância entre os eletrodos e o ajuste do fluxo da corrente terminal, que pode contribuir para diminuição da resistividade do sistema e do consumo de energia. Também serão realizados estudos de eletrocoagulação-flotação assistida com sonda de ultrassom, agitação e energia solar, que poderá contribuir para sustentabilidade energética do processo.

Finalmente, foi possível verificar que a ECF é um processo com grande potencial para o tratamento de efluentes provenientes de frigoríficos de suínos. Esta técnica também apresenta algumas vantagens quando comparada aos processos convencionais, como menor tempo de retenção; equipamentos simples e de fácil operação; não são utilizados produtos químicos no processo; mais segurança; versatilidade; reações rápidas; e sistemas em tamanho menor do que os sistemas tradicionais. Além disso, produz menor quantidade de lodo quando comparado com os processos convencionais.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UNISUL (Universidade do Sul de Santa Catarina), à FAPESC (Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina) e ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro recebido.

## REFERÊNCIAS

- AFONSO, M. D.; BÓRQUEZ, R. Review of the treatment of seafood processing wastewaters and recovery of proteins therein by membrane separation processes - prospects of the ultrafiltration of wastewaters from the fish meal industry. *Desalination*, v. 142, p. 29-45, 2002.
- AN, C.; HUANG, G.; YAO, Y.; ZHAO, S. Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review. *Science of the Total Environment*, v. 579, p. 537-556, 2017.
- APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22<sup>th</sup> ed. American Public Health Association: New York, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9897**. Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9898**. Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro, 1987.

BORJA, R.; BANKS, C. J.; WANG, Z. Performance of a hybrid anaerobic reactor combining a sludge blanket and filter, treating slaughterhouse. **Microbiol Biotechnology**, v. 43, p. 351-357, 1995.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União** nº 92. Brasília, 16 maio 2011.

CAMPOS, J. R. (coord.). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo, **Projeto PROSAB**. Rio de Janeiro, ABES, 1999.

CHEN, Q.; YANGA, Y.; ZHOUA, M.; LIUA, M.; YUA, S.; GAO, C. Comparative study on the treatment of raw and biologically treated textile effluents through submerged nanofiltration. **Journal of Hazardous Materials**, v. 284, p. 121-129, 2015.

CRESPILHO, F. N.; SANTANA, C. G.; REZENDE, M. O. O. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. **Química Nova**, v. 27, p. 387-392, 2004.

DIZGEA, N.; AKARSUA, C.; OZAYA, Y.; GULSENA, H. E.; KONEN, A. K. S.; MAZMANCI, M. A. Sono-assisted electrocoagulation and cross-flow membrane processes for brewery wastewater treatment. **Journal of Water Process Engineering**, v. 21, p. 52-60, 2018.

DUDA, R. M.; OLIVEIRA, R. A. Tratamento de águas residuárias de suinocultura em reator UASB e filtro anaeróbio em série seguidos de filtro biológico percolador. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 16, p. 91-100, 2011.

ELAZZOUI, M.; HABOUBI, K.; ELYOUBI, M. S. Electrocoagulation flocculation as a low-cost process for pollutants removal from urban wastewater. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 117, p. 614-626, 2017.

EMAMJOMEH, M. M.; SIVAKUMAR, M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. **Journal of Environmental Management**, v. 90, n. 1, p. 1663-1679, 2009.

HAKIZIMANA, J. N.; GOURICH, B.; CHAFI, M.; STIRIBA, Y.; VIAL, C.; DROGUI,

P.; NAJA, J. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. **Desalination**, v. 404, p. 1-21, 2017.

HE, L. Y.; YING, G. G.; LIU, Y. S.; SU, H. C.; CHEN, J.; LIU, S. S.; ZHAO, J. L. Discharge of swine wastes risks water quality and food safety: Antibiotics and antibiotic resistance genes from swine sources to the receiving environments. **Environment International**, v. 92-93, p. 210-219, 2016.

JOÃO, J. J.; EMERICKA, T.; FILHO, U. S.; NISHIHORA, R. K. Processo de eletrocoagulação-flotação: investigação dos parâmetros operacionais para o tratamento de águas residuais da indústria de pescados. **Química Nova**, v. 41, n. 2, p. 163-168, 2018.

KHORRAM, A. G.; FALLAH, N. Treatment of textile dyeing factory wastewater by electrocoagulation with low sludge settling time: Optimization of operating parameters by RSM. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, p. 635-642, 2018.

KOPARAL, A. S.; YILDIZ, Y. S.; KESKINLER, B.; DEMIRCI OGLU, N. Effect of initial pH on the removal of humic substances from wastewater by electrocoagulation. **Separation and Purification Technology**, v. 59, p. 175-182, 2008.

KUMAR, A.; NIDHEESH, P. V.; KUMAR, M. S. Composite wastewater treatment by aerated electrocoagulation and modified peroxi-coagulation processes. **Chemosphere**, v. 205, p. 587-593, 2018.

LIN, H.; LINA, Y.; WANG, D.; PANG, Y.; ZHANG, F.; TAN, S. Ammonium removal from digested effluent of swine wastewater by using solid residue from magnesium-hydroxide flue gas desulfurization process. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 58, p. 148-154, 2018.

LOU, Y.; YE, Z.; CHEN, S.; WEI, Q.; ZHANG, J.; YE, X. Influences of dissolved organic matters on tetracyclines transport in the process of struvite recovery from swine wastewater. **Water Research**, v. 134, p. 311-326, 2018.

MOTA, I. O.; CASTRO, J. A.; CASQUEIRA, R. G.; OLIVEIRA JUNIOR, A. G. Study of electroflotation method for treatment of wastewater from washing soil contaminated by heavy metals. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 4, p. 109-113, 2015.

MOUSSA, D. T.; EL-NAAS, M. H.; NASSER, M.; MOHAMMED, J.; AL-MARRI, M. J. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 186, p. 24-41, 2017.

SCARASSATI, D.; CARVALHO, R. F.; DELGADO, V. L.; CONEGLIAN, C. M. R.; BRITO, N. N.; TONSO, S.; DRAGONI SOBRINHO, G.; PELEGRINI, R. Tratamento de efluentes de matadouros e frigoríficos. *In*: FÓRUM DE ESTUDOS CONTÁBEIS, 3., **Fórum** [...]. Rio Claro, São Paulo, 2003. Disponível em: <http://www.ctec.ufal.br/professor/elca/TRATAMENTO%20DE%20EFLUENTES%20DE%20MATADOUROS%20E%20FRIGOR%C3%8DFICOS.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2018.

SEBRAE. **Oportunidades de negócios: noções iniciais para investir na suinocultura**. Florianópolis: SEBRAE NACIONAL, 25/04/2016. Disponível em: <http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/noco-es-iniciais-para-investir-em-suinocultura,c170ba4c8ad7d410VgnVCM1000003b74010aRCRD?origem=segmento&codSegmento=13>. Acesso em: 10 fev. 2018.

SEGURA, S. G.; OCON, J. D.; CHONG, M. N. Electrochemical oxidation remediation of realwastewater effluents: a review. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 113, p. 48-67, 2018.

TANG, Z. R.; HUANG, C. H.; TAN, W. B.; HE, X. S.; ZHANG, H.; LI, D.; XI, B. D. Electron Transfer Capacities of Dissolved Organic Matter Derived from Swine Manure Based on Electrochemical Method. **Chinese Journal of Analytical Chemistry**, v. 46, p. 422-431, 2018.

TSHINYANGU, K. K.; HENNEBERT, G. L. Protein and chitin nitrogen contents and protein content in *Pleurotus ostreatus* var. *Columbinus*. **Food Chemistry**, v. 57, n. 2, p. 223-227, 1996.

WAKI, M.; YASUDAA, T.; FUKUMOTOA, Y.; BÉLINE, F.; MAGRÍ, A. Treatment of swine wastewater in continuous activated sludge systems under different dissolved oxygen conditions: reactor operation and evaluation using modelling. **Bioresource Technology**, v. 250, p. 574-582, 2018.

*Recebido em: 23/03/2018*

*Aceito em: 29/05/2019*