

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA AMBIENTAL**

FLAVIA MANENTE DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA ELETROFLOCULAÇÃO NO PÓS-TRATAMENTO DE
EFLUENTE ANAERÓBICO DE ABATEDOURO E FRIGORÍFICO DE
SUÍNOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MEDIANEIRA
2018**

FLAVIA MANENTE DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA ELETROFLOCULAÇÃO NO PÓS-TRATAMENTO DE
EFLUENTE ANAERÓBICO DE ABATEDOURO E FRIGORÍFICO DE
SUÍNOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheira
Ambiental, da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Orssatto

MEDIANEIRA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

Avaliação da eletrofloculação no pós-tratamento de efluente anaeróbico de abatedouro e frigorífico de suínos

Por

Flavia Manente da Silva

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 14h do dia 21 de junho de 2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Medianeira. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Fábio Orssatto
UTFPR – Campus Medianeira
(Orientador)

Prof. Dr. Eduardo Eyng
UTFPR – Campus Medianeira
(Convidado)

Prof. Dr. Laercio Mantovani Frare
UTFPR – Campus Medianeira
(Convidado)

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Com certeza este é um dos tópicos mais difíceis de serem escritos, são tantas pessoas que fizeram parte da minha vida acadêmica e contribuíram de alguma maneira para que todo o esforço e cansaço valesse a pena e por isso merecem o meu mais sincero agradecimento.

Agradeço à minha família que sempre me apoiou e incentivou durante a busca dos meus sonhos, principalmente à minha mãe que é a pessoa mais incrível que já conheci.

Aos meus amigos e minhas amigas que foram os responsáveis por momentos únicos com muitas risadas, pizzas e uma alegria indescritível, especialmente quando isso acontecia na sala do PET. Sem isso teria sido muito difícil suportar todo o estresse da jornada acadêmica.

Ao André Bonizi pelo simples fato de ter entrado em minha vida e ter a deixado mais feliz.

À todos que passaram pelo grupo PETAMB, ensinando e aprendendo coisas valiosíssimas para a vida profissional e pessoal.

À todos os professores que compartilharam seu conhecimento durante todo este tempo.

Aos professores Eduardo Eyng e Laercio Mantovani Frare que aceitaram o convite para participar da banca, além de serem professores excepcionais que marcaram a minha graduação com suas aulas bem-humoradas.

Ao professor “pai” Fábio Orssatto que desde 2012 é uma figura essencial na minha jornada acadêmica. Serei eternamente grata por todo conhecimento, paciência e amizade durante esses 6 anos, todo esse aprendizado me fez ver a área ambiental com outros olhos e com toda certeza isso fez e fará toda a diferença no exercício da minha profissão. Muito obrigada.

À todas as pessoas que de alguma maneira deixaram sua marca e contribuíram para a minha evolução acadêmica, pessoal e profissional.

Com todo meu carinho e estima,
Obrigada, obrigada!

RESUMO

SILVA, Flavia Manente da; **Avaliação da eletrofloculação no pós-tratamento de efluente anaeróbico de abatedouro e frigorífico de suínos**; 2018, 44 fl. Trabalho de conclusão de curso (engenharia ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018.

A demanda por água de qualidade para o consumo doméstico e industrial cresce a cada dia, assim como a necessidade em encontrar alternativas viáveis do ponto de vista econômico e ambiental para tratar as águas residuárias oriundas dos processos industriais. Como exemplo de alternativa pode-se citar a eletrofloculação, técnica que se baseia no uso de corrente elétrica que proporciona a dissolução dos eletrodos metálicos e, conseqüentemente, a geração de compostos coagulantes, viabilizando o processo de remoção de contaminantes de efluentes. Com o objetivo de avaliar o desempenho da eletrofloculação, aplicada no tratamento de efluente de frigorífico e abatedouro de suínos submetido a um pré tratamento anaeróbio, montou-se um delineamento composto central rotacional (DCCR) para avaliar a remoção de cor, turbidez e DQO e custo do tratamento com duas variáveis independentes: corrente elétrica aplicada e tempo de eletrólise. Foi obtido um fatorial completo 2^2 com adição de 4 pontos axiais e 4 repetições no ponto central, totalizando 12 ensaios. A maior remoção da cor foi de 87,30% na condição operacional com corrente elétrica de 0,73 A e tempo de 18min34s. Para a DQO e turbidez o melhor desempenho foi observado com aplicação de 0,55 A de corrente elétrica por 20min, obtendo remoções de 80,60 e 76,38%, respectivamente. Observou-se que ensaios com elevada eficiência de remoção de cor, turbidez e DQO apresentam custos elevados. Dessa forma otimizou-se o processo de maneira a obter maiores remoções com menor custo. A condição operacional que proporcionou tais resultados é representada por corrente elétrica de 0,75 A e tempo de 10min, obtendo remoção de cor, turbidez e DQO de 88,85, 75,97 e 95,22%, respectivamente, com custo de 1,45 R\$.m⁻³. Além disso, estimou-se que é possível produzir até 10.832 m³ de metano a partir do efluente bruto produzido diariamente. Esse gás ao ser utilizado para geração de energia elétrica proporciona retorno financeiro de 1,13 R\$.m⁻³ de efluente tratado.

Palavras-chave: Cor. Custo. DQO. Metano. Turbidez.

ABSTRACT

SILVA, Flavia Manente da; **Evaluation of the electroflocculation in the post-treatment of anerobic effluent from swine slaughterhouse and fridge**; 2018, 44 fl. Trabalho de conclusão de curso (engenharia ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2018

The demand for quality water for domestic and industrial consumption is increasing every day, as it is needed to find alternatives that are economically and environmentally viable to treat wastewater from industrial processes. An example of an alternative is electroflocculation, a technique that is based on the use of electric current that provides the dissolution of the metal electrodes and consequently the generation of coagulant compounds, making possible the removal of effluent contaminants. In order to evaluate the performance of the electroflocculation applied in the effluent treatment of swine slaughterhouse and fridge submitted to an anaerobic pre-treatment, a central rotational compound (CRC) was designed to evaluate the removal of color, turbidity and COD and cost of treatment with two independent variables: electric current applied and electrolysis time, obtaining a complete factorial 2^2 with addition of 4 axial points and 4 repetitions at the central point, totaling 12 trials. The highest removal of the color was 87.30% obtained in 4th test, carried out with electric current of 0.73 A and time of 18m34s. For COD and turbidity the best performance was the 12th test with current of 0.55 A for 20 minutes, obtaining removals of 80.60 and 76.38%, respectively. It was observed that tests with high removal of the parameters present high costs, thus optimizing the process in order to obtain greater removals with lower cost. The operational condition that provides such results is represented by electric current of 0.75 A and time of 10m, obtaining removal of color, turbidity and COD of 88.85, 75.97 and 95.22%, respectively, with cost of 1.45 R \$.m⁻³. In addition, it was estimated that it is possible to produce up to 10,832 m³ of methane made from raw effluent produced daily when used for electric power generation, providing a financial return of 1.13 R \$.m⁻³ of treated effluent.

Keywords: Color. Cost. COD. Methane. Turbidity

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVOS.....	9
1.1.1 Objetivo Geral	9
1.1.2 Objetivos Específicos.....	9
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1 EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS.....	10
2.2 TRATAMENTO CONVENCIONAL DE EFLUENTES.....	11
2.2.1 Processos anaeróbios	12
2.3 TRATAMENTO ELETROLÍTICO	12
2.3.1 Reações eletroquímicas	15
2.3.2 Uso da eletrocoagulação no tratamento de efluente.....	16
3 METODOLOGIA.....	19
3.1 COLETA DAS AMOSTRAS	19
3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	19
3.3 ELETROFLOCULAÇÃO	20
3.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS.....	21
3.5 CUSTO OPERACIONAL.....	21
3.6 ANÁLISE DE DESEJABILIDADE.....	22
3.7 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE METANO.....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE BRUTO	24
4.2 REMOÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS.....	24
4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	25
4.3.1 Turbidez.....	25
4.3.2 Cor	27
4.3.3 Demanda Química de Oxigênio	29
4.4 CUSTO OPERACIONAL.....	31
4.4.1 Análise estatística do custo	33
4.5 ANÁLISE DE DESEJABILIDADE.....	35
4.6 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE METANO E CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA.....	38
5 CONCLUSÃO.....	40
6 REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

A necessidade humana em obter alimentos e demais itens, para proporcionar conforto e bem-estar, vem provocando uma série de alterações no equilíbrio natural dos ecossistemas, que devem se agravar cada vez mais. Em paralelo com a produção industrial é necessário que surjam soluções ambientais para os problemas criados.

A indústria alimentícia, que abastece milhões de pessoas diariamente, é responsável pela geração de volumes notáveis de resíduos sólidos, efluentes e emissões gasosas. Esses resíduos necessitam de tratamento adequado para minimizar os impactos ao ambiente.

Com relação aos efluentes, que normalmente contém elevada concentração de sólidos e matéria orgânica, o tratamento deve garantir que o lançamento em corpos hídricos ou mesmo a disposição em solo cause o mínimo de contaminação possível.

Na maioria das vezes o tratamento é realizado utilizando-se processos físicos como remoção de sólidos grosseiros, óleos e graxas; químicos que englobam desde a correção de pH até a precipitação de compostos de difícil remoção e biológicos, que tem como principal exemplo os vários tipos de lagoas.

As lagoas são largamente utilizadas devido a facilidade de construção e operação, no entanto para se obter a eficiência necessária e alcançar as concentrações de poluentes determinadas pela legislação para a disposição final, é preciso dispor de uma série de lagoas o que ocupa uma grande área da planta de tratamento de efluentes.

Em vista disso é desejável buscar métodos de tratamento compactos, mas que apresentem eficiência considerável. Um exemplo deste tipo de tratamento é a eletrofloculação, técnica que se utiliza do princípio eletrolítico para remover contaminantes dos efluentes.

A eletrofloculação dispensa a utilização de compostos químicos para realizar os processos de coagulação e floculação, já que com a passagem de corrente elétrica pelos eletrodos metálicos são liberados íons em solução que interagem com a água dando origem a espécies químicas com poder coagulante.

Estudar o tratamento de efluentes por meio de eletrofloculação e buscar configurações e condições que possibilitem alcançar maiores remoções com custos reduzidos é essencial para aprimorar as tecnologias existentes atualmente.

Embora a técnica se apresente com grande potencial para o uso em escala industrial ainda é preciso buscar maneiras de combinar a eletrofloculação com outros métodos de tratamento ou, até mesmo, com outras fontes de energia elétrica, já que o custo da mesma pode inviabilizar o uso do processo eletrolítico.

Uma das inúmeras opções é combinar processos anaeróbios, onde é possível captar o biogás produzido e utilizá-lo como fonte de energia elétrica, diminuindo a dependência das distribuidoras de energia e amortizando os custos do processo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência da eletrofloculação no pós-tratamento de efluente anaeróbio oriundo de abatedouro e frigorífico de suínos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Testar a técnica de eletrofloculação em efluente submetido ao tratamento anaeróbio;
- Analisar sua eficiência na remoção de DQO, cor, turbidez;
- Otimizar o processo por meio da modelagem matemática;
- Contabilizar o custo do tratamento eletrolítico;
- Estimar a produção de metano a partir do processo de tratamento anaeróbio.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS

A necessidade de água para a realização das atividades industriais é notória, segundo Mierzwa (2002) a quantidade e a qualidade de água requerida é definida por dois fatores:

- Ramo de atividade da indústria, que determina os níveis de qualidade da água que são requeridos, levando em conta que uma mesma indústria pode utilizar águas com diferentes níveis de qualidade, avaliados através de parâmetros físico-químicos e biológicos;

- Capacidade de produção, que define a quantidade de água necessária para cada uso.

Durante o processo produtivo grande parte da água utilizada se torna efluente, salvo em casos onde a mesma é incorporada no produto final. Os efluentes podem conter inúmeras substâncias, dependendo da natureza da indústria, dessa maneira é fundamental conhecer qualitativa e quantitativamente o efluente gerado, para dimensionar o tratamento adequado (MIERZWA, 2002).

A geração de efluentes ocorre em diversas áreas do processo produtivo, Rajeshwari et al. (2000) indicam os principais passos no que se refere a geração de efluentes, sendo eles: lavagem dos animais, sangria, escaldagem, lavagem de vísceras, lavagem do ambiente de trabalho dentre outros.

Pacheco; Yamanaka (2006) afirmam que um abatedouro e frigorífico de suínos consome entre 500 e 1500 litros de água por animal, com carga poluidora de aproximadamente 0,94 kgDBO₅/animal. Os autores justificam que a alta carga orgânica deve-se a presença de sangue, gordura, esterco, conteúdo estomacal e intestinal.

De acordo com Bustillo-Lecompte; Mehrvar (2015) a composição dos efluentes de abatedouro varia conforme sua natureza, mas de maneira geral é constituído por gorduras, proteínas, fibras, sangue e muco estomacal e intestinal. Os autores elencaram valores médios para diversos parâmetros, que podem ser visualizados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores médios para a composição de efluentes de abatedouros de suínos

Parâmetro	Valor médio	
	Bustillo-Lecompte; Mehrvar, (2015)	Pacheco; Yamanaka (2006)
COT (mg.L ⁻¹)	546	-
DBO ₅ (mg.L ⁻¹)	1.209	1.250
DQO (mg.L ⁻¹)	4.221	2.500
Nitrogênio total (mg.L ⁻¹)	427	150
Sólidos suspensos totais (mg.L ⁻¹)	1.164	700
pH	4,9 – 8,1	7,2
Cor (mg Pt .L ⁻¹)	290	-
Turbidez (UNT)	170	-
Óleos e graxas (mg.L ⁻¹)	-	150

Fonte: autoria própria

2.2 TRATAMENTO CONVENCIONAL DE EFLUENTES

Devido à grande variedade de contaminantes nos efluentes industriais são aplicados diversos processos para diminuir o grau de poluição dos mesmos. Normalmente a remoção se dá pelo emprego de métodos físicos, químicos e biológicos, utilizados isoladamente ou combinados (CAVALCANTI, 2012).

Nos processos físico-químicos convencionais de tratamento, que tem como objetivo reduzir sólidos em suspensão e coloidais, a clarificação do efluente ocorre por meio da adição de coagulantes químicos em quatro fases: neutralização, coagulação, floculação e sedimentação/flotação (CAVALCANTI, 2012).

O tratamento biológico tem como princípio a ação de micro-organismos que metabolizam a matéria orgânica, estabilizando-a. Os processos biológicos podem desenvolver-se de quatro maneiras distintas: na presença de oxigênio (processo aeróbio), com carência de oxigênio livre (processo anóxico), na ausência total de oxigênio (processo anaeróbio) ou em uma combinação dos processos (CAVALCANTI, 2012).

Como exemplo dos processos de tratamento biológico pode-se citar o sistema de lagoas, que constituem uma das formas mais simples de realizar o tratamento, sendo indicadas para países de clima quente (SCHATZMANN, 2009).

O sistema de lagoas apresenta algumas vantagens, como a eficiência para remoção de matéria orgânica, capacidade de suportar variações de cargas orgânicas e hidráulicas, baixo custo de construção e simplicidade para operação. Porém, quando são comparadas a outros métodos existe a desvantagem da grande área necessária para a implantação (SILVA, 2012).

2.2.1 Processos anaeróbios

O tratamento anaeróbio envolve uma série de processos biológicos onde a matéria orgânica é degradada dando origem a uma série de produtos gasosos, principalmente CH₄, CO₂ e H₂, e efluente com alta concentração de nutrientes, como nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio (FUEYO et al. 2003).

De acordo com Hernandez et al. (2017) a eficiência dos processos anaeróbios depende de uma série de fatores entre eles a gama de microrganismos presentes no sistema, que são responsáveis por degradar a matéria orgânica. No entanto esses microrganismos necessitam de compostos aceptores e doadores de elétrons, como nitratos, sulfatos e carbonatos, uma vez que em processos anaeróbios não há presença de oxigênio.

De maneira geral o tratamento anaeróbio é mais indicado para efluentes que possuem valores de média a alta carga orgânica, superando os tratamentos aeróbios com custo benefício, uma vez que requerem menos energia para o funcionamento, além de produzirem menor quantidade de lodo (RAGHAVAN et al., 2017).

2.3 TRATAMENTO ELETROLÍTICO

Os processos eletrolíticos envolvem a aplicação de corrente elétrica para proporcionar a clarificação de efluentes. De acordo com Kobya et al. (2010) esse tipo de processo recebe grande atenção devido a simplicidade, já que os equipamentos são de fácil operação, o processo é rápido, não há adição de coagulantes químicos e a produção de lodo é baixa.

De maneira ampla o processo de tratamento eletrolítico é representado pela sinergia entre três mecanismos distintos, sendo eles: eletrocoagulação onde ocorre a desestabilização dos contaminantes devido a aplicação de corrente elétrica no meio aquoso e formação de hidróxidos metálicos; eletroflotação que depende das bolhas de gás formadas no ânodo e no cátodo, já que estas se movem para a superfície carregando os agregados de partículas desestabilizadas e, por fim, a eletroxidação que envolve a decomposição da matéria orgânica (SAHU et al., 2014).

Segundo Mollah et al. (2004) a técnica de eletrocoagulação é um processo que envolve diversos fenômenos físicos e químicos que levam a corrosão do

eletrodo metálico, gerando íons *in situ* que viabilizam o processo de tratamento do efluente, que pode ser dividido em 3 etapas: (i) formação do agente coagulante devido aos íons formados; (ii) desestabilização das suspensões e emulsões de contaminantes; (iii) agregação das fases desestabilizadas e formação de flocos.

Vasudevan; Oturan (2014) explicam que a unidade de eletrocoagulação é constituída por uma célula eletrolítica com um ânodo e um cátodo, conhecidos como eletrodos de sacrifício que podem ser feitos do mesmo material ou não. O processo envolve a aplicação de corrente elétrica a esses eletrodos, dando origem ao agente coagulante e a bolhas de gases.

Durante o processo de eletroflotação são produzidas bolhas de oxigênio no ânodo e bolhas de hidrogênio no cátodo, enquanto que na eletrocoagulação são produzidas apenas as bolhas de hidrogênio. O sucesso da flotação em ambos os casos depende do tamanho das bolhas produzidas, sendo que bolhas menores podem proporcionar maiores áreas de contato para o arraste de partículas (VEPSÄLÄINEN, 2012).

Khandegar; Saroha (2013) afirmam que a combinação da técnica de eletrofloculação com outros processos proporciona grande eficiência na remoção de poluentes. A técnica apresenta diversas vantagens, entre elas estão a ausência de adição de coagulantes químicos, capacidade de remover poluentes que a coagulação convencional não removeria, além de produzir menor quantidade de lodo.

Em contrapartida, o uso da mesma é limitado pela necessidade do efluente apresentar um mínimo de condutividade elétrica, pela vida útil do ânodo, há possibilidade de formação de compostos organoclorados nos casos da presença de cloro no efluente, a formação de um filme de óxido na superfície do cátodo diminui sua vida útil (KHANDEGAR; SAROHA, 2013).

Bharath et al. (2018) elenca uma série de vantagens e desvantagens da eletrocoagulação. Entre as vantagens citam-se a facilidade de operação com equipamentos simples, a menor produção de lodo, as características dos flocos formados que são maiores, mais resistentes e carregam menos água, além de não necessitar da adição de coagulantes químicos e contribuir para a neutralização do pH, podendo ser usada com fontes alternativas de energia.

Como desvantagens tem-se a necessidade de trocar, periodicamente, os eletrodos, devido a corrosão do ânodo e formação de um filme de óxido no cátodo, a

necessidade de condutividade elevada no efluente e o custo da energia elétrica, que pode ser alto em determinadas regiões (BHARATH et al., 2018).

Sahu et al. (2014) descrevem inúmeros fatores que exercem influência durante o tratamento eletrolítico, alguns deles são:

- Material do eletrodo: existem várias opções de material a ser usado, como Al, Ag, Fe, Zn, sendo que a escolha do mesmo determina a eficiência do processo. Normalmente metais polivalentes tem alto poder coagulante devido a maior densidade de carga dos íons. Ferro e alumínio são os materiais mais comuns para o tratamento de efluentes devido a sua disponibilidade, baixo custo e boa dissolução no meio aquoso .

- Densidade de corrente: é o fator determinante para a dosagem de coagulante e geração de microbolhas, além de influenciar na mistura e transferência de massa entre os eletrodos, determinando a separação do contaminante. A corrente elétrica também está relacionada com a quantidade de metal do eletrodo que é dissolvido, sendo possível determinar essa quantidade por meio da Lei de Faraday, representada pela Equação 1:

$$w = \frac{i \cdot t \cdot M}{e \cdot F} \quad (1)$$

Onde:

W: quantidade de material dissolvido (g.s⁻¹);

i: corrente elétrica aplicada (A);

t: tempo de hidrólise (s);

M: massa molar do metal do eletrodo (g. mol⁻¹);

e: número de elétrons envolvido no processo de oxidação-redução;

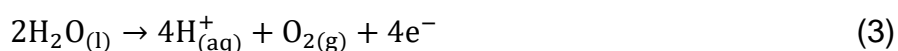
F: constante de Faraday (96.500 A. mol⁻¹).

- Tempo de reação: está intimamente ligado a corrente aplicada, uma vez que a quantidade de íons gerados depende da corrente e do tempo de hidrólise a qual o eletrodo foi submetido durante o tratamento (SAHU, et al. 2012). Nota-se que a concentração de coagulante gerado é diretamente proporcional a corrente aplicada e ao tempo de reação.

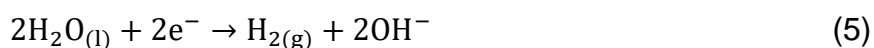
2.3.1 Reações eletroquímicas

De acordo com Mollah et al. (2004) quando o potencial elétrico é aplicado aos eletrodos o ânodo sofre oxidação, enquanto que o cátodo está sujeito aos processos de redução ou decomposição de metais. As reações eletroquímicas são representadas pelas Equações 2, 3, 4 e 5, onde “M” representa o metal que constitui o eletrodo.

- No ânodo:



- No cátodo:



Na Figura 1 estão ilustradas as reações básicas que ocorrem durante o processo eletrolítico. O íon formado pela dissolução do ânodo reage com a hidroxila formada no cátodo, dando origem ao composto amorfo $M(OH)_n$, que é capaz de adsorver e aprisionar partículas. Reações de polimerização subsequente dão origem ao composto $M_x(OH)_{xn}$ que promove a sedimentação ou flotação dos flocos formados (ERYURUK et al., 2014).

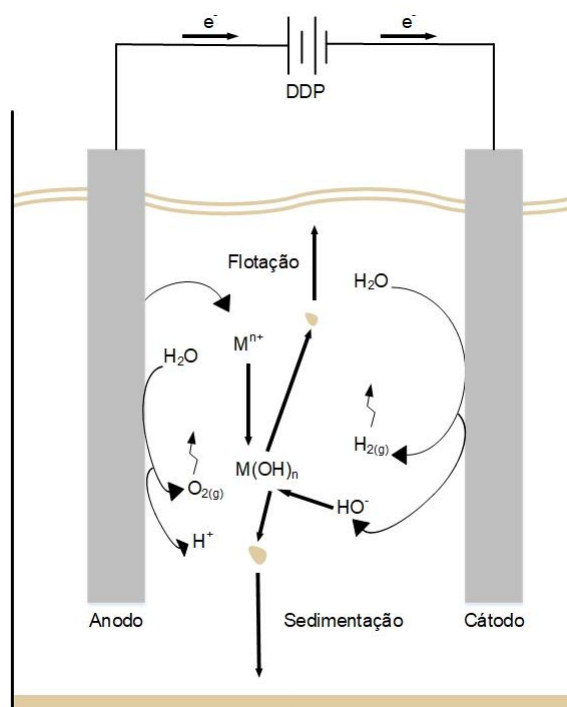
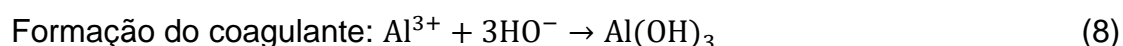
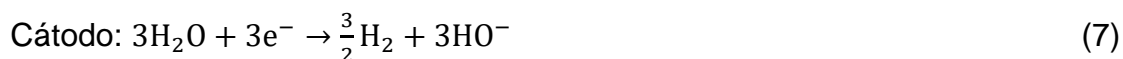


Figura 1. Ilustração do processo de eletrofloculação. (Adaptado de Mollah et al., 2004)
Fonte: autoria própria

Segundo Nouri et al. (2010) a técnica de eletroflotação envolve três processos distintos e interdependentes: eletroquímica, coagulação e hidrodinâmica, que atuando simultaneamente garantem o sucesso do tratamento. Os autores descrevem as reações para o uso de eletrodos de alumínio, indicadas pelas Equações 6, 7 e 8.



Nos casos em que o potencial é suficientemente elevado podem ocorrer reações secundárias no ânodo, levando a formação de gás oxigênio e gás cloro, devido a oxidação de compostos orgânicos (NOURI et al., 2010).

2.3.2 Uso da eletrocoagulação no tratamento de efluente

Ün et al. (2009) estudaram a remoção de DQO em efluentes de abatedouros de bovinos em sistema de tratamento híbrido com eletrodos de alumínio e ferro e avaliando o efeito da densidade de corrente, pH inicial e adição de polieletrólito. No caso do eletrodo de alumínio, a eletrocoagulação foi combinada com a adição de policloreto de alumínio (PAC) agindo como coagulante auxiliar, encontrando remoção de 94,4% de DQO com a adição de 0,75 g.L⁻¹ de PAC. O eletrodo de ferro foi combinado com processo de fenton, resultando na remoção de 81,1% de DQO no caso da adição de 9% de H₂O₂.

Kumar et al. (2009) aplicaram a técnica de eletrocoagulação em efluente de um biodigestor de uma destilaria. Foram utilizados eletrodos de ferro e avaliados a densidade de corrente aplicada, pH inicial, distância entre os eletrodos e tempo de hidrólise, encontrando remoção máxima de 50,5% para a DQO e 95,2% para a cor, na condição de corrente de 44,65 A/m², pH inicial de 8, distância dos eletrodos de 2 cm e tempo de 120 min.

Yetilmezsoy et al. (2009) avaliaram a eficiência de eletrodos de ferro e alumínio na remoção de cor e DQO de efluente avícola submetido a pré-tratamento anaeróbico, obtendo como resultado para a condição ótima de operação a combinação de eletrodos de alumínio, pH inicial de 5, densidade de corrente de 15

$\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ e tempo de hidrólise de 20 minutos com remoção de 90% da DQO e 92% da cor.

Borba et al. (2010) submeteram efluente avícola ao processo de eletrofloculação controlando o pH inicial, tempo de reação e densidade de corrente aplicada, encontrando valores de 98,4%, 99,4% e 97,6% para a remoção de DQO, cor e turbidez, respectivamente, na condição de pH inicial de 4, tempo de eletrólise de 20 minutos e densidade de corrente de $43,9 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$.

Pauli et al. (2012) estudaram a remoção de matéria orgânica de efluentes de frigorífico utilizando a técnica de eletrocoagulação e controlando o pH inicial do efluente, tempo de hidrólise e intensidade da corrente, avaliando a remoção de cor, turbidez e DQO, com respostas de 94, 98 e 87% respectivamente, para pH de 5, tempo de eletrólise 52,5 min e corrente de 4 A.

Jotin et al. (2012) avaliaram a remoção de DQO do lixiviado de aterro sanitário submetido ao processo de eletrofloculação, controlando a voltagem aplicada, condutividade e pH inicial, encontrando remoção máxima de 74,08%.

Biassi (2014) submeteu efluente bruto de um frigorífico e abatedouro de suínos ao tratamento eletrolítico controlando a diferença de potencial aplicada e o tempo de hidrólise e avaliando a remoção de cor, turbidez e DQO, encontrando remoções máximas de 98, 99 e 81% respectivamente, na condição de 27 V e 20 minutos.

Valente et al. (2015) estudaram a remoção de DQO, sólidos totais e suas frações e turbidez de efluente de laticínios por meio da eletrocoagulação utilizando eletrodos de alumínio. Na melhor condição operacional as remoções foram de 57% para DQO, 99% para turbidez, 92% para os sólidos suspensos e 97% de sólidos voláteis, com custo de $3,48 \text{ R}\$.\text{m}^{-3}$ para a condição otimizada.

Safari et al. (2016) avaliaram a remoção de DQO e diesel de efluente oleoso por meio da aplicação de eletrocoagulação avaliando a influência do pH, tempo de reação, voltagem aplicada, concentração de eletrólito adicionada, material do eletrodo e concentração inicial de diesel. As maiores remoções para DQO e diesel foram de 99,1% e 98,8%, respectivamente, com consumo de energia estimado em $6,47 \text{ kWh}\cdot\text{m}^{-3}$.

Fernandes et al. (2017) utilizaram efluente oriundo do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos municipais para testar as técnicas de coagulação química, eletrocoagulação e oxidação eletroquímica, encontrando remoção máxima

de DQO em torno de 50% para a coagulação química com adição de 70 g.L^{-1} de coagulante durante 2 horas. Para a eletrocoagulação a remoção máxima foi de 80% para a condição de 5 cm entre os eletrodos, corrente de 1 A por 5 horas, já para a oxidação eletroquímica a maior remoção foi de 43% com corrente elétrica de 0,5 A durante 6 horas.

3 METODOLOGIA

3.1 COLETA DAS AMOSTRAS

O efluente utilizado nos testes é oriundo de um abatedouro e frigorífico de suínos localizado na região oeste do Paraná, que tem capacidade para abater até 6.500 animais por dia, gerando em torno de 3.360 m³ de efluente diariamente. Este efluente é submetido a um sistema de tratamento com operações primárias, seguido de tratamento biológico e físico-químico, como pode ser visualizado na Figura 2.

Foram coletados aproximadamente 30 L de efluente na saída da lagoa anaeróbia I. O mesmo foi armazenado em recipientes plásticos e mantido sobre refrigeração até a realização de todos os testes.

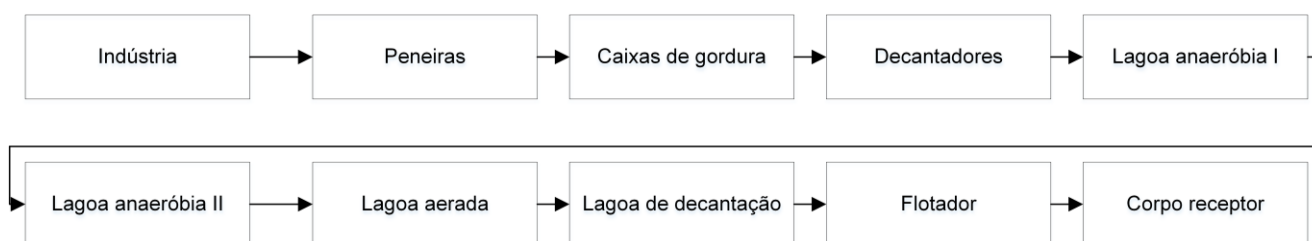


Figura 2. Sistema de tratamento do abatedouro e frigorífico
Fonte: autoria própria

3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Com o intuito de avaliar a remoção de DQO, cor e turbidez montou-se um delineamento composto central rotacional (DCCR) com duas variáveis independentes: corrente aplicada (A) e tempo de eletrólise (minutos), obtendo um fatorial completo 2² com 4 pontos axiais e 4 repetições no ponto central, totalizando 12 ensaios, sendo que a matriz do DCCR pode ser visualizada na Tabela 2.

As variáveis codificadas X_1 e X_2 correspondem a corrente e ao tempo, respectivamente, sendo que a relação de conversão é dada pelas Equações 9 e 10:

$$\text{Para corrente:} \quad 1,41 i = 0,25 X_1 + 0,776 \quad (9)$$

$$\text{Para o tempo:} \quad 1,41 T = 5 X_2 + 21,15 \quad (10)$$

Onde:

i: valor real da corrente (A);

X_1 : variável codificada relacionada a corrente;

T: valor real do tempo (minutos);

X₂: variável codificada relacionada ao tempo.

Tabela 2. Condições do planejamento experimental

Ensaio	X ₁	X ₂	Densidade de corrente (A.cm ⁻²)
1	-1 (0,37)	-1 (11'27")	0,0074
2	1 (0,73)	-1 (11'27")	0,0146
3	-1 (0,37)	1 (18'34")	0,0074
4	1 (0,73)	1 (18'34")	0,0146
5	0 (0,55)	0 (15'00")	0,0110
6	0 (0,55)	0 (15'00")	0,0110
7	0 (0,55)	0 (15'00")	0,0110
8	0 (0,55)	0 (15'00")	0,0110
9	-1,41 (0,30)	0 (15'00")	0,0060
10	1,41 (0,80)	0 (15'00")	0,0160
11	0 (0,55)	-1,41 (10'00")	0,0110
12	0 (0,55)	1,41 (20'00")	0,0110

Fonte: autoria própria

O uso do DCCR permite elaborar um modelo matemático que pode ser usado para a obtenção de uma superfície de resposta, quando o mesmo for válido estatisticamente, e com isso encontrar condições otimizadas para realização do processo em questão (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

Devido a adição de pontos axiais o modelo codificado obtido a partir da análise do DCCR é do tipo quadrático que de maneira geral pode ser descrito pela Equação 11.

$$y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{12}X_1X_2 \quad (11)$$

Onde y representa a resposta obtida e os fatores b_n são parâmetros encontrados a partir da análise de regressão.

3.3 ELETROFLOCULAÇÃO

Os ensaios foram realizados em batelada, para isso utilizou-se um béquer de 1 L onde foram adicionados 0,8 L do efluente, que foi mantido em agitação durante o processo com o auxílio de um agitador magnético, os eletrodos foram imersos no efluente e ligados a uma fonte de corrente contínua. A Figura 3 ilustra a montagem do esquema utilizado.

Foram utilizados dois eletrodos, um cátodo e um ânodo, ambos de alumínio com dimensões de 10 cm de altura e 5 cm de largura que ficaram totalmente imersos no efluente, com espaçamento de 8,5 cm entre eles. A corrente elétrica aplicada foi controlada por meio do ajuste da fonte.

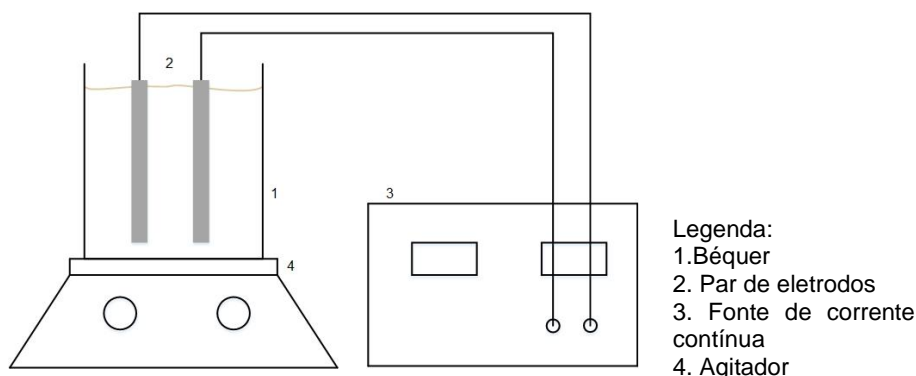


Figura 3. Esquema do sistema de eletrofloculação em batelada
 Fonte: autoria própria

3.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Foi analisada a remoção dos parâmetros de cor, turbidez e matéria orgânica, quantificada através da demanda química de oxigênio (DQO). Para a caracterização do efluente foi mensurado o pH, além dos parâmetros já citados. As metodologias utilizadas seguiram os padrões da *Apha Standarts Methods* (2011) e podem ser encontradas na Tabela 3.

Tabela 3. Métodos utilizados para as análises físico-químicas

Parâmetro	Método	Apha (2011)
Cor	Espectrofotométrico	2120 C
DQO	Colorimétrico de refluxo fechado	5220 D
Turbidez	Nefelométrico	2130 B
pH	Eletrométrico	4500 B

Fonte: autoria própria

3.5 CUSTO OPERACIONAL

Para realizar o cálculo do custo de operação associado ao tratamento eletrolítico consideraram-se o consumo dos eletrodos e o consumo de energia elétrica, uma vez que o ensaio foi realizado em bancada. Em escala real outras fontes de custos são: a construção do sistema de tratamento, a mão de obra para operação e manutenção do sistema e a disposição final do lodo (ORSSATTO,2017).

Para encontrar o consumo de energia elétrica utilizou-se a Equação 12.

$$J = \frac{U \cdot i \cdot t}{V} \quad (12)$$

Onde:

- J: consumo de energia (Wh. m⁻³);
- U: diferença de potencial (V);
- i: corrente elétrica (A);
- t: tempo de hidrólise (h);
- V: volume do efluente tratado (m³).

A massa do eletrodo consumida durante o ensaio foi calculada utilizando-se a Equação 13:

$$M_{Al} = \frac{i \cdot t \cdot M}{e \cdot F \cdot V} \quad (13)$$

Em que:

- M_{Al}: massa consumida do eletrodo por volume (kg. m⁻³);
- i: corrente elétrica (A);
- t: tempo de aplicação (s);
- M: massa molar do metal do eletrodo (26,98 g. mol⁻¹);
- e: número de elétrons envolvidos na reação (3);
- F: constante de Faraday (96.500 s.A.mol⁻¹);
- V: volume do efluente tratado (m³).

Com valores da massa consumida dos eletrodos e do consumo de energia elétrica é possível encontrar o custo da operação por meio da Equação 14:

$$Co = aJ + bM_{Al} \quad (14)$$

Onde:

- Co: custo operacional (R\$.m⁻³);
- a: custo da energia elétrica (0,691 R\$ kWh⁻¹);
- J: consumo de energia elétrica (kWh.m⁻³);
- b: custo do alumínio (6,78 R\$. kg⁻¹);
- M_{Al}: massa de alumínio consumida (kg.m⁻³).

3.6 ANÁLISE DE DESEJABILIDADE

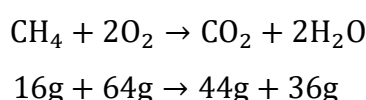
A análise de desejabilidade é uma técnica de otimização simultânea que examina todas as respostas obtidas, combinando-as em uma condição operacional que proporcione a maximização dos resultados. Neto et al. (2010) explicam que a

desejabilidade reduz todas às respostas a um único valor, denominado desejabilidade global e descrito pela média geométrica das várias desejabilidades.

Para realizar a análise é necessário determinar o intervalo aceitável para a resposta. Admite-se que a desejabilidade situa-se em uma faixa entre 0 e 1, sendo 0 uma desejabilidade inaceitável e 1 o valor mais desejável para a resposta (NETO et al., 2010).

3.7 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE METANO

Com o intuito de diminuir o custo com energia elétrica devido ao tratamento eletrolítico estimou-se a produção de metano no processo anaeróbio e seu potencial na geração de energia elétrica, confronto a eletricidade que pode ser gerada a partir do efluente com a eletricidade necessária para o tratamento. Para isso utilizou-se a metodologia proposta por Chernicharo (1997), que se baseia na reação química:



De acordo com a relação estequiométrica de massas para cada 16g de metano são necessárias 64g de oxigênio, isso quer dizer que para produzir e oxidar 16g de metano são removidas 64g de DQO do efluente, a partir disso é possível relacionar a remoção de DQO com a produção de metano, sendo que a Equação 15 ilustra a produção teórica do gás (CHERNICHARO, 1997).

$$V_{\text{CH}_4} = \frac{\text{DQO}_{\text{CH}_4}}{A} \quad (15)$$

Onde:

- V_{CH_4} = volume de metano produzido (L);
- DQO_{CH_4} = carga de DQO removida no reator ($\text{gDQO} \cdot \text{dia}^{-1}$);
- A = fator de correção para a temperatura do reator ($\text{gDQO} \cdot \text{L}^{-1}$) que pode ser calculado utilizando a Equação 16.

$$A = \frac{P \cdot K}{R \cdot (273 + t)} \quad (16)$$

Onde:

- P = pressão atmosférica (1 atm);
- K = DQO correspondente a 1 mol de CH_4 ($64\text{gDQO} \cdot \text{mol}^{-1}$);
- R = constante dos gases ($0,08206 \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);
- t = temperatura de operação do reator ($^{\circ}\text{C}$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE ANAERÓBIO

Com o intuito de avaliar a eficiência da técnica em remover matéria orgânica (DQO), cor e turbidez caracterizou-se a amostra bruta utilizada para os testes. Os resultados podem ser visualizados na Tabela 4.

Comparando os valores encontrados com os limites máximos de lançamentos estipulados pela Resolução CONAMA 430/2011 e pelo Anexo 7 da Resolução CEMA 07/2009, disponíveis na Tabela 4, percebe-se a necessidade em tratar o efluente antes do seu lançamento em corpo hídrico, devido ao alto valor da DQO. Com relação aos parâmetros de cor e turbidez não há limite estabelecido pelas legislações.

Tabela 4. Caracterização do efluente bruto

Parâmetro	Efluente anaeróbio	CONAMA 430/2011	CEMA 070/2009
DQO (mg.L ⁻¹)	2.185	-	200
Cor (UC)	5.000	-	-
Turbidez (UNT)	434	-	-
pH	8,71	5 a 9	-

Fonte: autoria própria

4.2 REMOÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Analisando a Figura 4 é possível perceber que o comportamento da remoção da DQO, cor e turbidez foi semelhante na maioria dos ensaios. Nota-se claramente que o ensaio 9 realizado com corrente de 0,3 A por 15 minutos, obteve os menores valores de remoção para todos os parâmetros, sendo 31,12 % para a DQO, 37,33% para a turbidez e 59,90% para a cor.

O ensaio 4 que corresponde a corrente de 0,73 A e tempo de 18 minutos e 34 segundos demonstrou ser o mais eficiente para a remoção da cor, alcançando 87,30% de remoção. Já para a turbidez e DQO as maiores remoções foram de 80,60% e 76,38%, respectivamente, observadas no ensaio 12, conduzido com corrente de 0,55 A e tempo de 20 minutos.

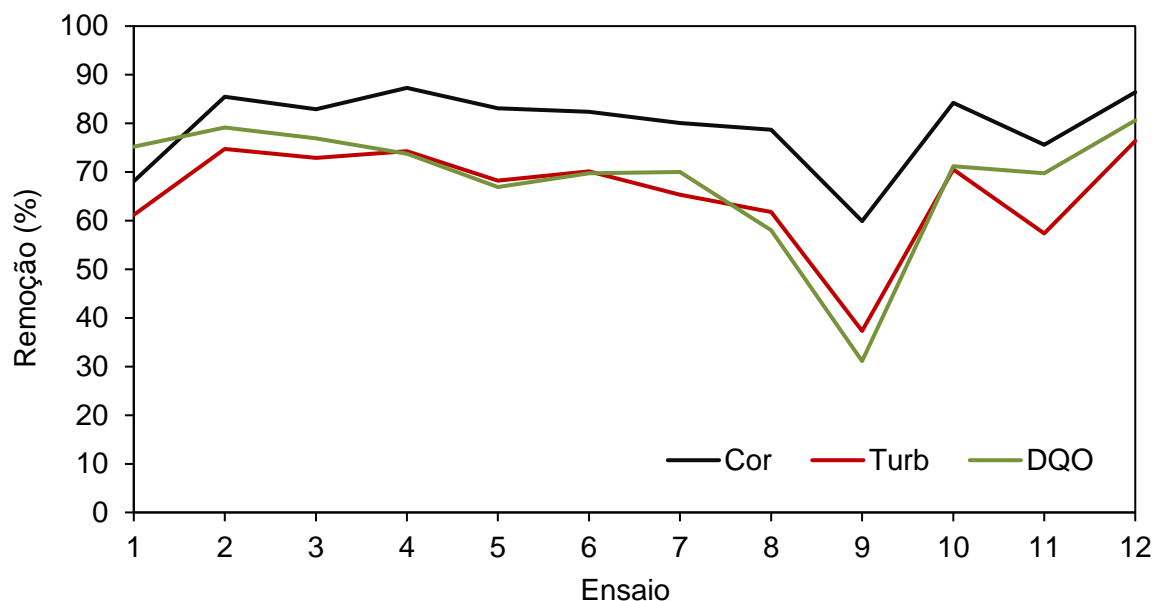


Figura 4. Eficiência de remoção da cor, turbidez e DQO em função das condições operacionais
Fonte: autoria própria

4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

4.3.1 Turbidez

A análise estatística para a remoção da turbidez mostrou que apenas o termo X_1 linear é significativo no intervalo de confiança de 90%, conforme pode ser visto na Tabela 5, já que foi o único que obteve o p-valor menor do que 0,10.

Tabela 5. Efeitos das variáveis sobre a remoção da turbidez

Fator	Efeito	Erro padrão	t(6)	p-valor	Coefficientes de regressão
Média	66,328	4,161	15,942	0,000	66,328
X_1 (L)	15,486	5,893	2,628	0,039	7,743
X_1 (Q)	-7,238	6,606	-1,096	0,315	-3,619
X_2 (L)	9,552	5,893	1,621	0,156	4,776
X_2 (Q)	5,800	6,606	0,878	0,414	2,900
$X_1.X_2$	-6,106	8,322	-0,734	0,491	-3,053

Legenda

X_1 : corrente (L): linear
 X_2 : tempo (Q): quadrático

Fonte: autoria própria

Percebe-se que a variável quadrática X_2 e a interação entre as variáveis possuem os maiores valores para o fator p-valor, assim os mesmos foram ignorados

do modelo e incorporados aos resíduos, obtendo os resultados da Tabela 6. Nota-se que as variáveis X_1 e X_2 lineares possuem efeito positivo sobre a resposta, ou seja, aumentando o valor de cada uma delas a resposta sofre um aumento. Já a variável X_1 (Q) possui efeito negativo, aumentando seu valor a remoção da turbidez é reduzida.

Tabela 6. Efeitos das variáveis e análise de regressão para a turbidez

Fator	Efeito	Erro padrão	t(8)	p-valor	Coefficientes de regressão
Média	68,636	3,083	22,262	0,000	68,636
X_1 (L)	15,486	5,633	2,749	0,025	7,743
X_1 (Q)	-8,381	6,191	-1,354	0,213	-4,191
X_2 (L)	9,552	5,633	1,696	0,128	4,776

Legenda

X_1 : corrente (L): linear
 X_2 : tempo (Q): quadrático

Fonte: autoria própria

Por meio da análise de variância (ANOVA) do modelo encontrado, que pode ser visualizada na Tabela 7, fica evidente que o modelo é válido já que o $F_{calculado}$ é superior ao $F_{tabelado}$ e o p-valor é inferior a 0,10, isso significa que as variações observadas na resposta de remoção da turbidez foram provocadas pelos fatores da regressão, as variáveis X_1 e X_2 lineares e a variável X_1 quadrática, e não pelos erros inerentes ao processo, com R^2 igual a 0,6052.

Tabela 7. ANOVA para o modelo matemático da remoção da turbidez

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	p-valor
Regressão	776,113	3	258,704	4,089	2,924	0,049
Resíduo	506,152	8	63,269			
Total	1282,265	11				

Fonte: autoria própria

Com os dados da regressão é possível construir o modelo matemático com variáveis codificadas, definido pela Equação 17 e representado graficamente pelas Figuras 5 e 6.

$$\%remoção_{turbidez} = 68,636 + 7,743 X_1 - 4,191 X_1^2 + 4,776 X_2 \quad (17)$$

O gráfico de contorno representado pela Figura 5 permite encontrar com facilidade a região de melhor remoção da turbidez, situada entre 0,73 e 0,8 A de corrente elétrica e 18'34" e 20 minutos de reação. Na Figura 6 é possível observar a

superfície de resposta que permite analisar a remoção da turbidez em três dimensões.

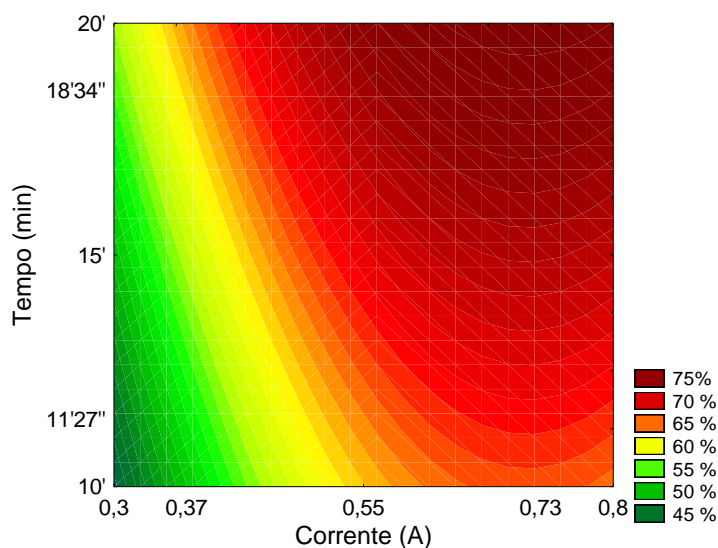


Figura 5. Gráfico de contorno para a remoção da turbidez
Fonte: autoria própria

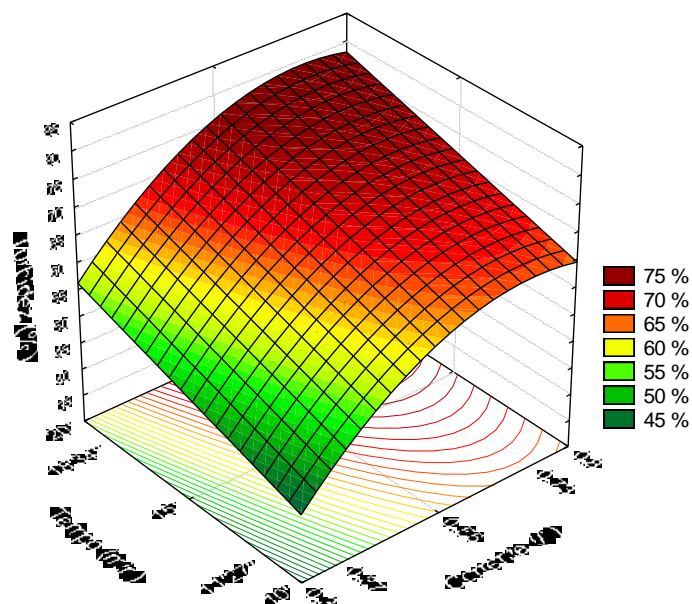


Figura 6 Superfície de resposta para a remoção da turbidez
Fonte: autoria própria

4.3.2 Cor

Analisando os dados da Tabela 8 percebe-se que os fatores X_1 linear e quadrático e X_2 linear foram significativos em um intervalo de 90% de confiança, já que o p-valor calculado foi inferior a 0,10. Porém o fator X_2 quadrático e a interação $X_1.X_2$ não são significativos.

Tabela 8. Efeitos das variáveis estudadas sobre a remoção da cor

Fator	Efeito	Erro padrão	t(6)	p-valor	Coefficientes da regressão
Média	81,062	1,733	46,782	0,000	81,062
X_1 (L)	14,058	2,454	5,728	0,001	7,029
X_1 (Q)	-6,826	2,751	-2,481	0,048	-3,413
X_2 (L)	7,981	2,454	3,252	0,017	3,990
X_2 (Q)	2,177	2,751	0,791	0,459	1,089
$X_1.X_2$	-6,500	3,466	-1,876	0,110	-3,250

Legenda

X_1 : corrente (L): linear

X_2 : tempo (Q): quadrático

Fonte: autoria própria

Desta maneira realizou-se uma nova análise ignorando os efeitos que não foram significativos, obtendo os resultados contidos na Tabela 9. Nota-se que as

variáveis lineares X_1 e X_2 possuem efeito positivo, isso significa que aumentando o valor de ambas as variáveis é possível aumentar a remoção da cor. De maneira inversa ocorre para o termo quadrático da variável X_1 , já que seu efeito é negativo, ao aumentar o valor da mesma a remoção da cor sofre um decréscimo.

Tabela 9. Efeitos das variáveis significativas na remoção da cor

Fator	Efeito	Erro padrão	t(8)	p-valor	Coefficientes da regressão
Média	81,928	1,513	54,164	0,000	81,928
X_1 (L)	14,058	2,764	5,087	0,001	7,029
X_1 (Q)	-7,256	3,037	-2,389	0,044	-3,628
X_2 (L)	7,981	2,764	2,888	0,020	3,990

Legenda

X_1 : corrente (L): linear

X_2 : tempo (Q): quadrático

Fonte: autoria própria

A análise de variância do modelo matemático obtido por meio da regressão, observada na Tabela 10, permite concluir que o mesmo é válido em um nível de confiança de 90%, já que o p-valor foi inferior a 0,10 e o $F_{calculado}$ foi superior ao $F_{tabelado}$. Assim, pode-se afirmar que a resposta observada para a cor é influência pelos fatores da regressão (X_1 linear, X_1 quadrático e X_2 linear) e R^2 de 0,8361.

Tabela 10. ANOVA do modelo

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	p-valor
Regressão	607,965	3	202,655	13,307	2,924	0,002
Resíduo	121,8313	8	15,229			
Total	729,7967	11				

Fonte: autoria própria

Com esses resultados foi possível construir um modelo matemático, representado pela Equação 18, que descreve a remoção da cor.

$$\%remoção_{cor} = 81,928 + 7,029 X_1 - 3,628X_1^2 + 3,990X_2 \quad (18)$$

A representação gráfica do modelo matemático pode ser visualizada na Figura 7. Por meio do gráfico de contorno é possível concluir que aumentando a corrente aplicada e tempo de hidrólise obtém-se valores elevados de remoção da cor, além disso a região ótima situa-se na faixa de 0,73 a 0,8 A para a corrente e de 18'34" a 20 minutos para o tempo de hidrólise, que coincide com a região ótima para a remoção da turbidez. A superfície de resposta, representada pela Figura 8, permite

analisar a remoção da cor de maneira mais intuitiva, já que evidencia o percentual de remoção em três dimensões.

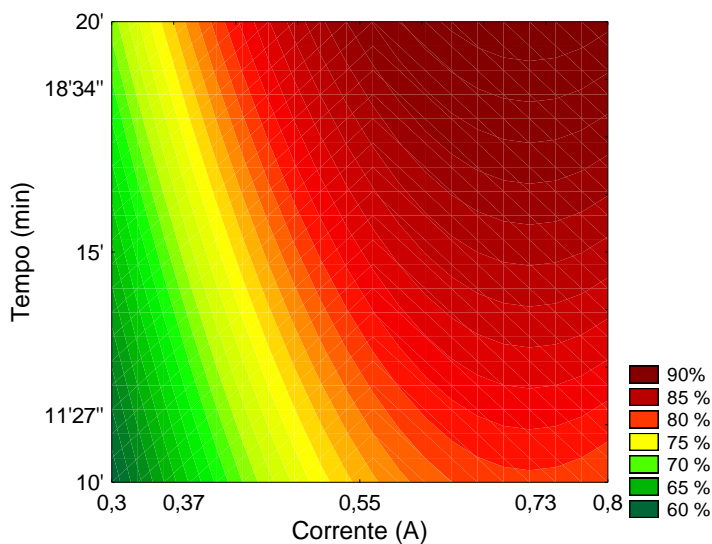


Figura 7. Gráfico de contorno para a remoção da cor
Fonte: autoria própria

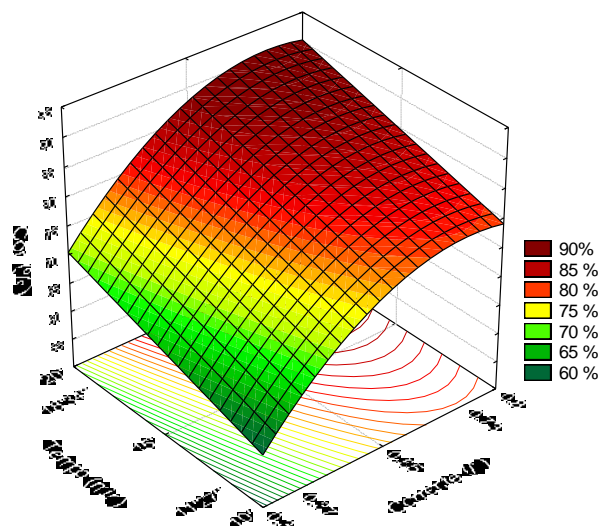


Figura 8. Superfície de resposta para a remoção da cor
Fonte: autoria própria

Demanda Química de Oxigênio

A análise de regressão, visualizada na Tabela 11, permite observar que para a remoção da DQO nenhuma variável apresenta efeito significativo em um intervalo de 90% de confiança, uma vez que o p-valor de todas foi superior a 0,10.

Tabela 11. Efeitos das variáveis sobre a remoção de DQO

Fator	Efeito	Erro padrão	t(6)	p-valor	Coefficientes da regressão
Média	66,122	6,027	10,971	0,000	66,122
X ₁ (L)	14,373	8,536	1,684	0,143	7,187
X ₁ (Q)	-8,477	9,569	-0,886	0,410	-4,238
X ₂ (L)	2,911	8,536	0,341	0,745	1,455
X ₂ (Q)	15,695	9,569	1,640	0,152	7,847
X ₁ .X ₂	-3,576	12,054	-0,297	0,777	-1,788

Legenda

X₁: corrente (L): linear

X₂: tempo (Q): quadrático

Fonte: autoria própria

No entanto ignorando as variáveis com p-valor mais elevado (X₂ linear e a interação X₁.X₂) e incorporando-as ao resíduo é possível obter uma nova análise de regressão, expressa pela Tabela 12, onde percebe-se que as variáveis X₁ linear e X₂

quadrática são significativas com 90% de confiança, além disso ambas variáveis possuem efeito positivo na resposta analisada, enquanto que a variável X_1 quadrática possui efeito negativo.

Tabela 12. Efeitos das variáveis sobre a remoção da DQO com alguns fatores ignorados

Fator	Efeito	Erro padrão	t(8)	p-valor	Coeficientes da regressão
Média	66,122	5,307	12,458	0,000	66,122
X_1 (L)	14,373	7,517	1,912	0,092	7,187
X_1 (Q)	-8,477	8,427	-1,006	0,344	-4,238
X_2 (Q)	15,695	8,427	1,862	0,100	7,847

Legenda

X_1 : corrente (L): linear
 X_2 : tempo (Q): quadrático

Fonte: autoria própria

A análise de variância da regressão, que pode ser vista na Tabela 13, deixa evidente que o modelo obtido é válido, já que o $F_{calculado}$ é superior ao $F_{tabelado}$ e que o p-valor é inferior a 0,10 com R^2 de 0,5318.

Tabela 13. ANOVA da análise de regressão

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	p-valor
Regressão	1023,807	3	341,269	3,029	2,924	0,093
Resíduo	901,427	8	112,678			
Total	1925,235	11				

Fonte: autoria própria

Desta maneira o modelo matemático que descreve a remoção de DQO na faixa estudada é definido pela Equação 19 e representado por meio de gráficos nas Figuras 9 e 10.

$$\%remoção_{DQO} = 66,122 + 7,187 X_1 - 4,238 X_1^2 + 7,847 X_2^2 \quad (19)$$

O gráfico de contorno, Figura 9, permite visualizar que a região ótima para a remoção não encontra-se dentro da faixa estudada, porém percebe-se uma tendência de aumento na remoção em regiões de corrente elétrica elevada, acima de 0,55 A, com valores extremos de tempo, acima de 18 minutos e abaixo de 11 minutos. A representação em três dimensões do gráfico de contorno, conforme a Figura 10, mostra que o ponto central encontra-se em uma região de sela, com aumento da remoção nos pontos extremos do tempo.

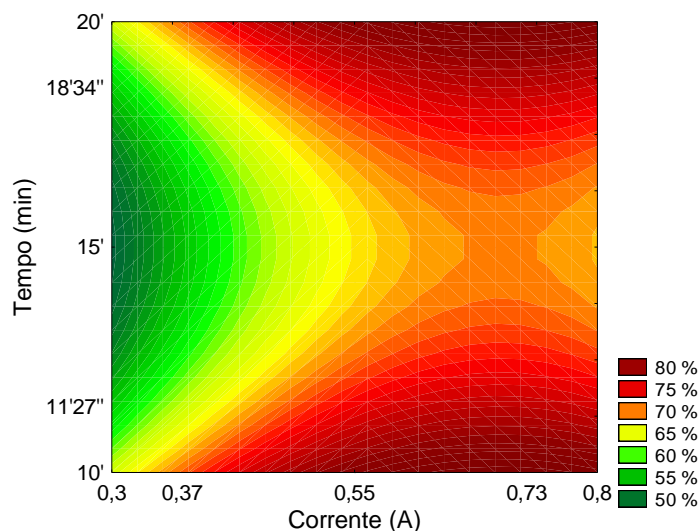


Figura 6. Gráfico de contorno para a DQO
Fonte: autoria própria

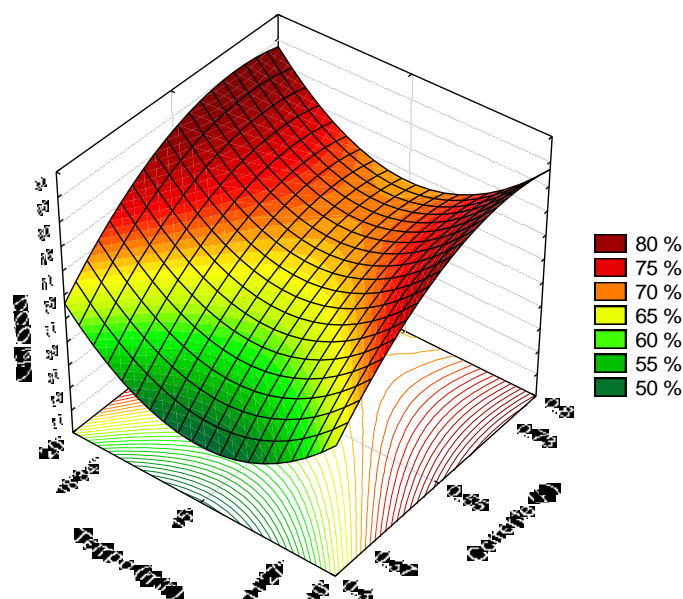


Figura 5. Superfície de resposta para a remoção de DQO
Fonte: autoria própria

4.4 CUSTO OPERACIONAL

O custo operacional de cada ensaio depende do consumo de energia e do consumo dos eletrodos, devido a dissolução do metal. Utilizando as Equações 12 e 13 foi possível calcular os referidos parâmetros, os resultados podem ser visualizados na Tabela 14.

Tabela 14. Cálculo do consumo de energia e do eletrodo

Ensaio	Corrente (A)	DDP (V)	Tempo (h)	Consumo de energia (Wh.m ⁻³)	Consumo eletrodo (g.m ⁻³)
1	0,37	11,10	0,191	979,69	29,61
2	0,73	9,95	0,191	1732,65	58,42
3	0,37	9,75	0,309	1395,40	48,02
4	0,73	18,10	0,309	5110,86	94,74
5	0,55	13,90	0,250	2389,06	57,66
6	0,55	13,90	0,250	2389,06	57,66
7	0,55	14,85	0,250	2552,34	57,66
8	0,55	15,30	0,250	2629,69	57,66
9	0,30	8,75	0,250	820,31	31,45
10	0,80	21,05	0,250	5262,50	83,88
11	0,55	15,20	0,167	1741,67	38,44
12	0,55	14,30	0,333	3277,08	76,89

Fonte: autoria própria

Considerando a tarifa de energia para a classe industrial aplicada pela Companhia Paranaense de Energia Elétrica – COPEL de R\$ 0,691 por kWh consumido (COPEL, 2017) e o preço mensal do alumínio de 6,78 R\$.kg⁻¹

(INDEXMUNDI, 2018), foi possível calcular o custo operacional de cada ensaio por meio da Equação 14, que encontram-se ilustrados na Tabela 15.

Nota-se que os ensaios 4 e 10 obtiveram maiores custos, de 4,17 e 4,20 R\$.m⁻³ respectivamente, uma vez que ambos tiveram correntes e tempos de aplicação elevados, sendo que o menor custo foi 0,78 R\$.m⁻³ obtido no ensaio 9.

Tabela 15. Custo operacional dos ensaios

Ensaio	Corrente	Tempo	Custo (R\$.m ⁻³)
1	-1	-1	0,88
2	1	-1	1,59
3	-1	1	1,29
4	1	1	4,18
5	0	0	2,04
6	0	0	2,04
7	0	0	2,16
8	0	0	2,21
9	-1,41	0	0,78
10	1,41	0	4,21
11	0	-1,41	1,46
12	0	1,41	2,79

Fonte: autoria própria

Observando a Figura 7 é possível comparar o custo de cada ensaio com sua respectiva remoção. De maneira geral ensaios com alta porcentagem de remoção apresentam custos elevados, no entanto o ensaio 12 que obteve valores para remoção de cor, turbidez e DQO de 86,40%, 80,60% e 76,38%, respectivamente apresentou custo relativamente reduzido, em torno de 2,78 R\$.m⁻³.

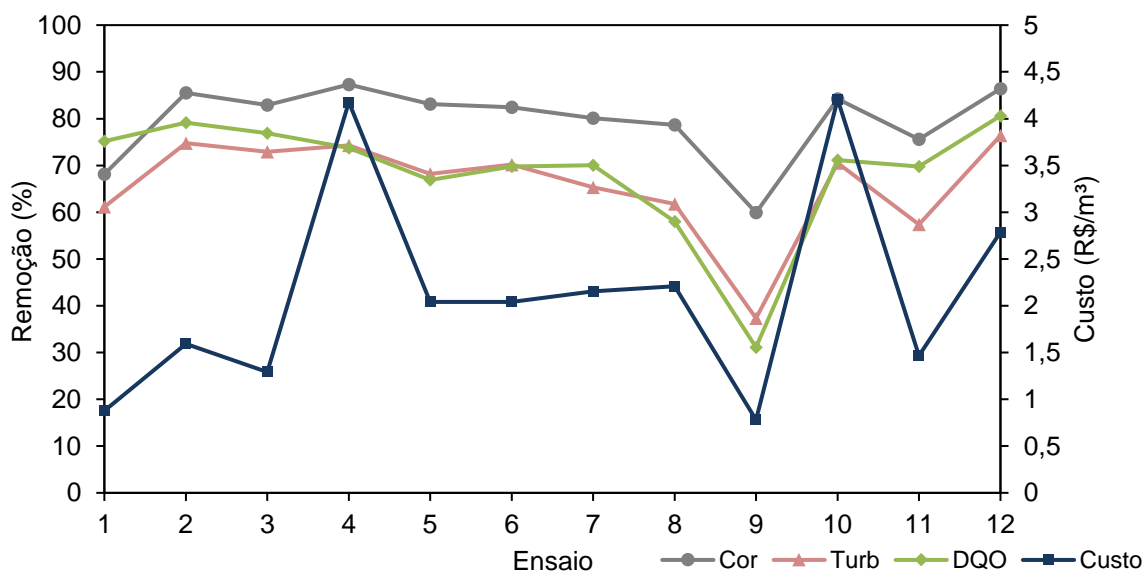


Figura 7. Comparação do custo com os valores de remoção
Fonte: autoria própria

4.4.1 Análise estatística do custo

Com o objetivo de otimizar o custo operacional realizou-se a análise de variância do mesmo, que pode ser vista na Tabela 16. Percebe-se que as variáveis quadráticas relacionadas a X_1 e X_2 não foram significativas em um nível de 90% de confiança, já que o p-valor de ambos foi superior a 0,10.

Tabela 16. Efeitos das variáveis sobre o custo

Fator	Efeito	Erro padrão	t(6)	p-valor	Coefficientes da regressão
Média	1,917	0,146	13,132	0,000	1,917
X_1 (L)	1,937	0,207	9,372	0,000	0,969
X_1 (Q)	0,204	0,232	0,879	0,413	0,102
X_2 (L)	1,110	0,207	5,372	0,002	0,555
X_2 (Q)	-0,142	0,232	-0,611	0,563	-0,071
$X_1.X_2$	1,004	0,292	3,439	0,014	0,502

Legenda

X_1 : corrente (L): linear
 X_2 : tempo (Q): quadrático

Fonte: autoria própria

Ignorando as variáveis quadráticas e realizando novamente a análise de regressão obtém-se os resultados descritos na Tabela 17. Nota-se que todas as variáveis possuem efeito positivo sobre o custo, ou seja, aumentando a corrente e o tempo a tendência é de que o custo aumente, o que está de acordo com as Equações 9 e 10, já que o tempo e a corrente são proporcionais ao consumo dos eletrodos e ao consumo de energia elétrica, principais componentes do custo.

Tabela 17. Efeito das variáveis significativas sobre o custo

Fator	Efeito	Erro padrão	t(6)	p-valor	Coefficientes da regressão
Média	1,937	0,081	23,881	0,000	1,937
X_1 (L)	1,937	0,199	9,735	0,000	0,969
X_2 (L)	1,110	0,199	5,580	0,001	0,555
$X_1.X_2$	1,004	0,281	3,573	0,007	0,502

Legenda

X_1 : corrente (L): linear
 X_2 : tempo (Q): quadrático

Fonte: autoria própria

Com isso é possível calcular a ANOVA da regressão, que pode ser observada na Tabela 18. O $F_{\text{calculado}}$ foi superior ao F_{tabelado} , da mesma maneira que o p-

valor inferior a 0,10 indicam a validade do modelo matemático, com R^2 de 0,9455, descrito pela Equação 20 e representado graficamente pela Figura 12.

$$\text{Custo (R$. m}^{-3}\text{)} = 1,937 + 0,969 X_1 + 0,555 X_2 + 0,502 X_1 X_2 \quad (20)$$

Tabela 18. ANOVA do modelo matemático do custo

Fonte	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	Fcalculado	Ftabelado	p-valor
Regressão	10,95	3	3,650349	46,22797296	2,92	0,000021
Resíduo	0,63171	8	0,078964			
Total	11,58276	11				

Fonte: autoria própria

Analisando a Figura 12 nota-se que os menores valores do custo encontram-se na região de 0,3 a 0,55 A de corrente elétrica e tempo de 10 a 20 minutos. A superfície de resposta, que pode ser visualizada na Figura 13, demonstra com mais clareza que há uma forte interação entre corrente e tempo.

Observando o valor do efeito das variáveis percebe-se que a corrente apresenta efeito aproximadamente duas vezes superior ao tempo, que é comprovado analisando a inclinação do plano, direcionado para o aumento da corrente.

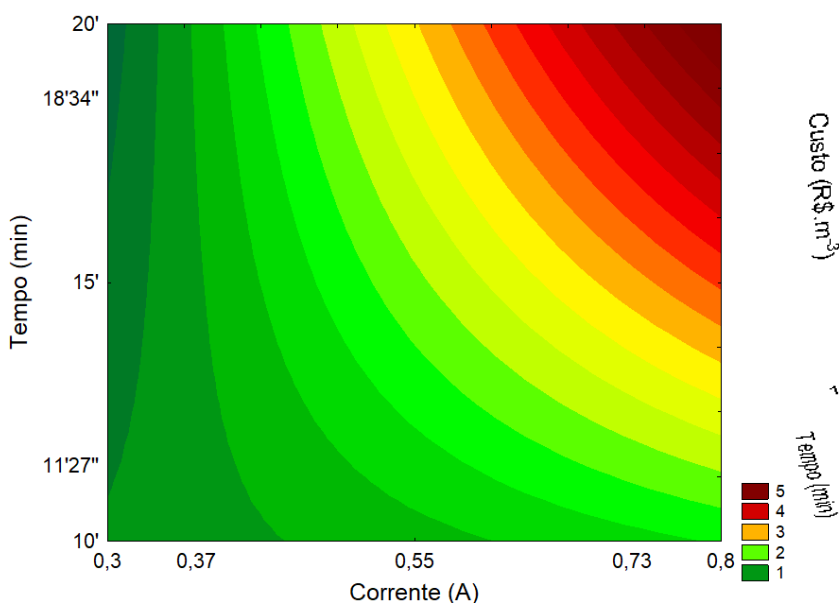


Figura 8. Gráfico de contorno para o custo

Fonte: autoria própria

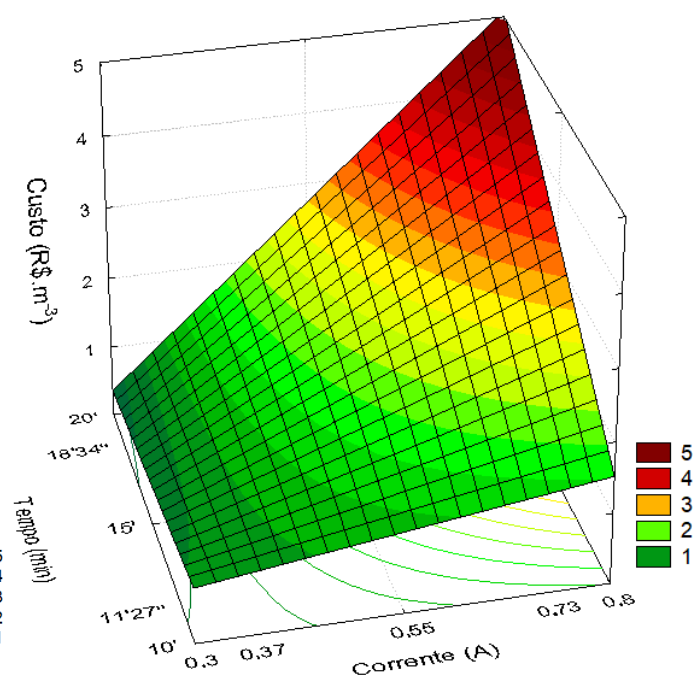


Figura 9. Superfície de resposta para o custo

Fonte: autoria própria

4.5 ANÁLISE DE DESEJABILIDADE

Com o objetivo de encontrar as condições que proporcionam as maiores remoções de cor, turbidez e DQO simultaneamente realizou-se a análise de desejabilidade dos modelos matemáticos obtidos. Os resultados podem ser visualizados na Figura 14.

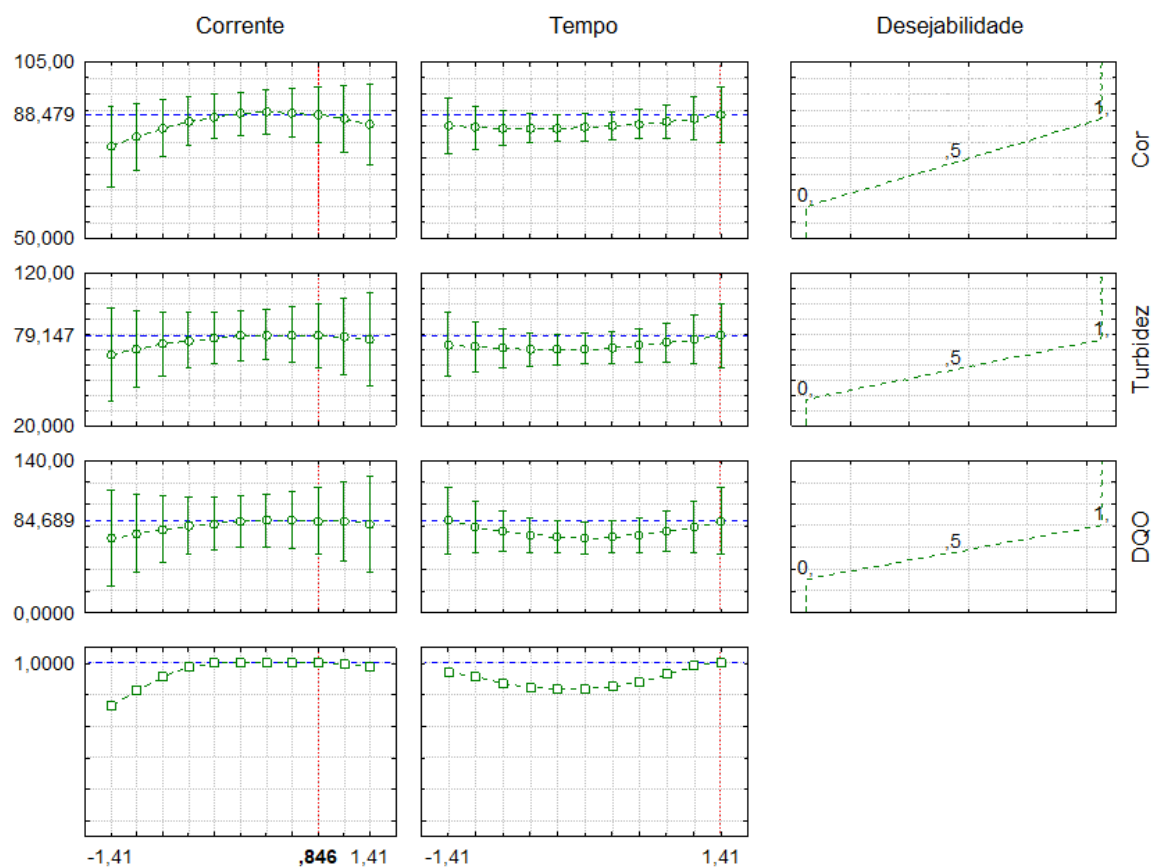


Figura 10. Análise de desejabilidade da remoção de cor, turbidez e DQO
Fonte: autoria própria

Os três gráficos do lado direito da Figura 14 representam os níveis de desejabilidade de remoção definidos para cada parâmetro, de maneira que o valor 1 representa a máxima remoção pretendida, ou seja, o resultado que se deseja atingir.

Os dois gráficos inferiores representam a desejabilidade global obtida, com indicação das condições operacionais de corrente elétrica e tempo de aplicação que são necessários para obter as maiores remoções, que neste caso equivalem aos valores apresentados na Tabela 19.

Tabela 19. Condições de máxima remoção dos parâmetros físico-químicos

Parâmetro	Valor codificado	Valor real
Corrente	0,846	0,7 A
Tempo	1,41	20 minutos

Fonte: autoria própria

Levando em conta o custo operacional para realizar o tratamento é interessante buscar uma condição de máxima remoção e custos reduzidos, em vista disso realizou-se a análise de desejabilidade levando em conta o custo obtido em cada ensaio, a análise pode ser observada na Figura 15.

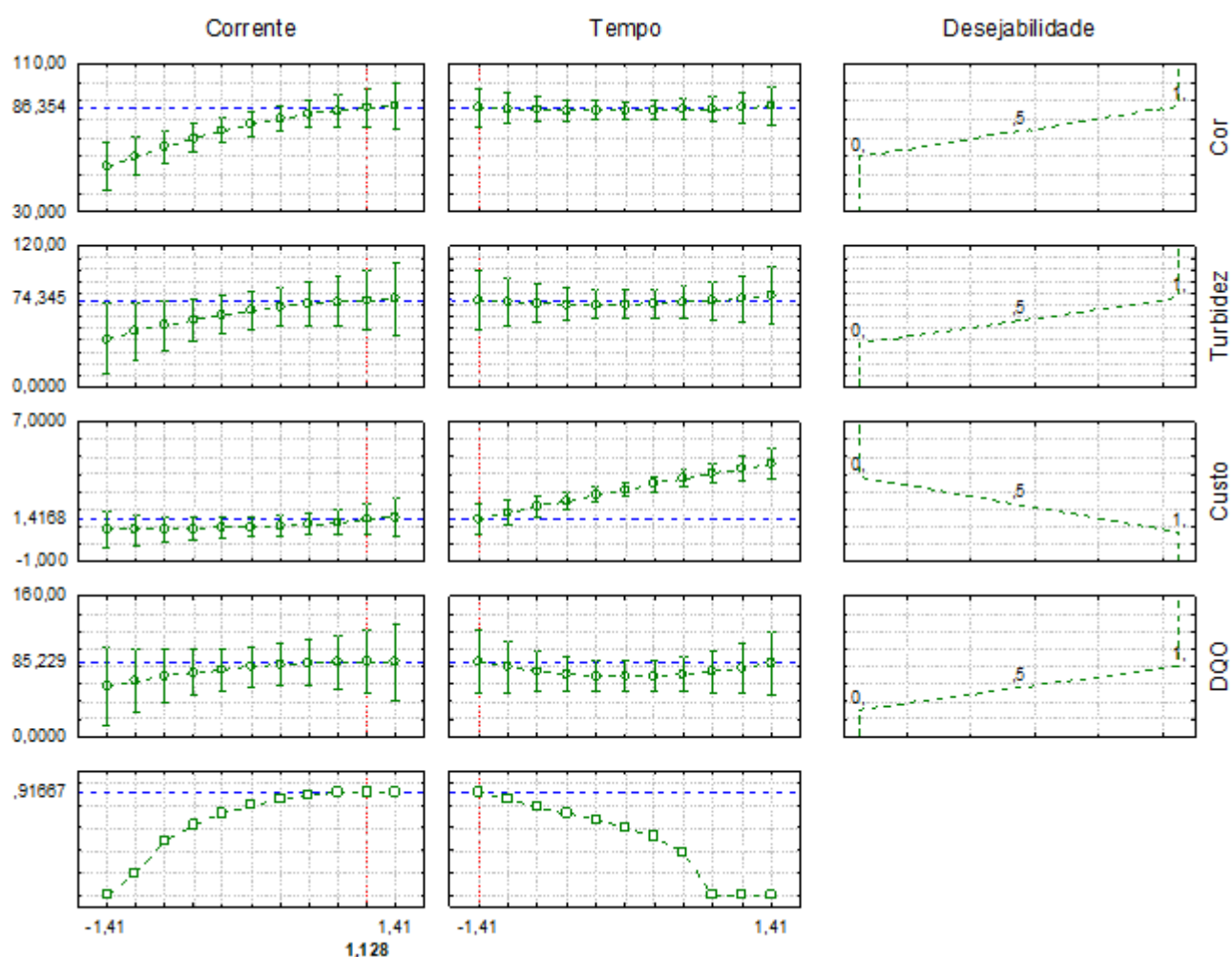


Figura 11. Análise de desejabilidade das remoções e do custo
Fonte: autoria própria

Percebe-se que para o custo a desejabilidade pretendida encontra-se no menor valor, isso porque espera-se maximizar as remoções, porém reduzir o custo do tratamento. Com isso obteve-se as condições apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20. Desejabilidade do custo e das remoções

Parâmetro	Valor codificado	Valor real
Corrente	1,128	0,75 A
Tempo	- 1,41	10 minutos

Fonte: autoria própria

É evidente que as condições encontradas por meio da análise de desejabilidade seriam diferentes para a situação em que não considerava o custo e para o caso da análise com o custo, na Tabela 21 é possível observar as duas situações.

Tabela 21. Condições encontradas para a análise de desejabilidade

Parâmetro	Desejabilidade	
	Sem custo	Com custo
Corrente (A)	0,70	0,75
Tempo (min)	20,00	10,00
Remoção da Cor (%)	96,10	88,85
Remoção da Turbidez (%)	84,92	75,97
Remoção da DQO (%)	90,84	95,22
Custo (R\$.m ⁻³)	4,14	1,45

Fonte: autoria própria

Nota-se que ao avaliar o custo em conjunto com as remoções a corrente sofreu um acréscimo enquanto que o tempo foi reduzido, além disso o custo nesta condição foi de 1,45 R\$.m⁻³, enquanto que na análise de desejabilidade que não leva em consideração o custo, é possível calcular o mesmo por meio do modelo matemático encontrado, obtendo o valor de 4,14 R\$.m⁻³ que é 185,52% superior ao custo otimizado.

Para a remoção da cor e da turbidez houve redução no cenário que considerou o custo, porém para a DQO observou-se o contrário com aumento da taxa de remoção. Considerando a remoção de 95,22% de DQO e sua concentração inicial de 2.185 mg.L⁻¹, a concentração após o tratamento deve ficar em torno de 104 mg.L⁻¹ que encontra-se dentro do padrão de lançamento estipulado pela legislação CEMA 070/2009, com custo de 1,45 R\$.m⁻³ de efluente tratado.

4.6 ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE METANO E CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA

Considerando a concentração de DQO que entra no tratamento anaeróbio (DQO afluente) e a DQO restante após o tratamento (DQO efluente) é possível determinar a quantidade de DQO removida no processo e convertida em biogás.

Com dados de vazão média calcula-se a carga de DQO removida e, por meio das Equações 15 e 16, encontra-se o volume estimado para a produção de metano que pode ser visualizado na Tabela 22, considerando a temperatura média para Medianeira de 19,4°C (CLIMATE-DATA, 2018).

Tabela 22. Estimativa da produção de metano

Parâmetro	Valor	Unidade
DQO afluente	3,0475	g.L ⁻¹
DQO efluente	2,1850	g.L ⁻¹
DQO removida	0,8625	g.L ⁻¹
Vazão	3.360.000	L.dia ⁻¹
Carga de DQO removida	2.898.000	g.dia ⁻¹
K(t)	2,6673	gDQO.L ⁻¹
Volume CH ₄	1.086,49	m ³ .dia ⁻¹

Fonte: autoria própria

De acordo com Machado (2016) cada m³ de metano é capaz de gerar em torno de 9,97 kWh, com isso a geração total de energia a partir do metano produzido no tratamento é de aproximadamente 10.832 kWh.dia⁻¹, sem levar em consideração as perdas de energia devido ao funcionamento do motor gerador.

Na Tabela 23 é possível observar a descrição dos gastos na situação otimizada a partir da análise de desejabilidade, onde o custo diário total de energia elétrica é de R\$ 3677,27.

O custo obtido na condição operacional de corrente elétrica de 0,75 A e tempo de 10 minutos é de 1,45 R\$.m⁻³, no entanto esse custo se refere a energia consumida e ao consumo dos eletrodos. Considerando a corrente e tempo da condição, obtém-se que o custo associado a manutenção dos eletrodos é 0,36 R\$.m⁻³ e conseqüentemente 1,09 R\$.m⁻³ se referem ao consumo de energia, sendo que este valor foi utilizado para a comparação com a energia proveniente do aproveitamento do metano.

Tabela 23. Panorama de custos da situação otimizada

Parâmetro	Valor	Unidade
Corrente	0,75	A
Tempo	10	min
Custo da energia	1,09	R\$.m ⁻³
Custo total de energia	3677,27	R\$.dia ⁻¹
Consumo de energia	5.320,27	kWh.dia ⁻¹

Fonte: autoria própria

Considerando o custo da energia de 0,69 R\$. (kWh)⁻¹ tem-se que a produção estimada de energia a partir do metano é equivalente a 7.487,10 R\$.dia⁻¹ comprados da rede de distribuição. Como o custo diário com energia é de R\$ 3.677,27 o uso da energia proveniente do metano proporciona retorno financeiro de R\$ 3.809,83 por dia, ou seja, lucro de 1,13 R\$.m⁻³ de efluente tratado.

5 CONCLUSÃO

A análise dos dados permite concluir que a técnica de eletrofloculação aplicada como pós tratamento de efluente anaeróbio é eficiente, já que se obteve remoções elevadas para cor, turbidez e DQO, alcançando os objetivos da pesquisa.

O ensaio 4 realizado com 0,73 A de corrente elétrica com tempo de 18'34" alcançou a maior remoção de cor, em torno de 87,30%. Já para a turbidez e DQO as maiores remoções foram de 76,38 e 80,60 % respectivamente, observadas no ensaio 12 realizado com corrente de 0,55 A e tempo de 20 minutos.

Além disso com a análise estatística foi possível obter modelos matemáticos válidos para o cenário das remoções dos parâmetros, permitindo a otimização do processo. Para a cor e turbidez a região operacional ótima para as remoções situa-se na faixa de corrente elétrica aplicada variando de 0,73 a 0,8 A e tempo de 18 minutos e 34 segundos até 20 minutos. Para a DQO observa-se que as maiores remoções são obtidas com corrente elétrica acima de 0,55 A e tempo superior a 18 minutos ou inferior a 11 minutos.

Com relação ao custo conclui-se que para obter alta taxa de remoção dos parâmetros os valores financeiros são elevados. No entanto a análise de desejabilidade permitiu encontrar condições de corrente elétrica e tempo que proporcionam as maiores remoções com o menor custo. Operando com corrente elétrica de 0,75 A por 10 minutos é possível remover 88,85% da cor, 75,97% da turbidez e 95,22% da DQO com custo de 1,45 R\$.m⁻³.

Para amenizar o custo é possível utilizar o metano produzido no tratamento anaeróbio para a geração de energia. Estimou-se que é possível gerar por dia até 10.832 kWh, energia suficiente para conduzir o processo de eletrofloculação na condição otimizada por meio da análise de desejabilidade e ainda obter lucro financeiro de R\$ 3.809,83 por dia.

Dessa maneira observa-se o uso da técnica eletrolítica para o tratamento de efluentes proporciona remoções significativas dos contaminantes além de possibilitar o uso combinado com outros métodos, como o tratamento anaeróbio, e com isso diminuir custo.

6 REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**, Washington, DC: APHA, 2011

BHARATH, M.; KRISHNA B. M.; KUMAR, M. B.; A review of electrocoagulation process for wastewater treatment; **International Journal of ChemTech Research**, v. 11 n.3 p.289-302, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.20902/IJCTR.2018.110333>> acessado em 22 de maio de 2018

BIASSI, B. F.; **Tratamento de efluente de matadouro e frigorífico de suíno em reator batelada de eletrofloculação**. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Gestão Ambiental), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2014. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/5528/1/MD_COGEA_2014_2_08.pdf> acessado em 14 de abril de 2018

BORBA, F. H.; MANENTI, D. R.; MÓDENES, A. N.; MORA, N. D.; ESPINOZA-QUINONES, F. R.; PALÁCIO, S. M.; YASSUE, P. H.; NASCIMENTO, R. do; Avaliação da eficiência da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de indústrias de subprodutos avícolas; **Estudos Tecnológicos**, v. 6, n. 1, p. 36-47, 2010. Disponível em: <doi.org/doi:10.4013/ete.2010.61.04> acessado em 11 de abril de 2018

BRASIL, **Resolução CONAMA 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, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.

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**, v. 161, p-287-302, 2015.

CAVALCANTI, J. E. W. de A.; **Manual de tratamento de efluentes industriais**, São Paulo: Engenho Editora Técnica Ltda., 2ª ed., 2012

CHERNICHARO, C. A. de L.; **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - reatores anaeróbios**; 5 ed., 246p. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 1997

CLIMATE-DATA; **Clima: Medianeira**. Disponível em: <<https://pt.climate-data.org/location/43579/>> acessado em 30 de maio de 2018

ERYURUK, K; TEZCANUN, U.; BAKIR OGUTVEREN, U.; Electrocoagulation in a plugflow reactor: the treatment of cattle abattoir wastewater by iron rod anodes; **Int. J. Environ. Res.**, v. 8, ed. 2, p. 461-468, 2014. Disponível em: <https://ijer.ut.ac.ir/article_738_36.html> acessado em 05 de abril de 2018

FERNANDES, A.; JESUS, T.; SILVA, R.; PACHECO, M. J.; CIRÍACO, L.; LOPES, A.; Effluents from anaerobic digestion of organica wastes: treatment by chemical and electrochemical processes; **Water ,Air, & Soil Pollution**; 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11270-017-3620-1>> acessado em 19 de maio de 2018

FUEYO, G.; GUTIÉRREZ, A.; BERRUETA, J.; Kinectics of anaerobic treatment of landfill leachates combined with urban wastewaters, **Waste Management e Research**, v. 21, p. 145-154, 2003. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12739729>> acessado em 11 de abril de 2018

HERNANDEZ, L. E. M.; LOZANO, M. G.; GARCIA, Y. P.; NAVARRO, R. O.; BALAGURUSAMY, N.; **Microbiology and biochemistry of anaerobic treatment; Biological Treatment of Industrial Effluents**; p. 231-259, 2017.

JOTIN, R.; IBRAHIM, S.; HALIMOON, N.; Electro coagulation for removal of chemical oxygen demand in sanitary landfill leachate; **International Journal of Environmental Sciences**, v. 3, n.2, 2012. Disponível em: <<http://ipublishing.co.in/ijesarticles/twelve/articles/volthree/EIJES31092.pdf>> acessado em 11 de abril de 2018

KHANDEGAR, V.; SAROHA, A. K.; Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - a review; **Journal of Environmental Management**, v. 128, p. 949-963, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.043>> acessado em 05 de abril de 2018

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

KUMAR, M.; PONSELVAN, F. I. A.; MALVIYA, J. R.; SRIVASTAVA, V. C.; MALL, I. D.; Treatment of bio-digester effluent by electrocoagulation using iron electrodes, **Journal of Hazardous Materials**, v. 165, p. 345-352, 2009. Disponível em: <https://ac.els-cdn.com/S0304389408014775/1-s2.0-S0304389408014775-main.pdf?_tid=ef595687-bc68-448c-89fb-1a8760960fa2&acdnat=1523555712_ce5a0e35d78ef923e6931cfde0d90111> acessado em 12 de abril de 2018

MACHADO, G. B.; **Biogás**; Portal do Biogás. Disponível em: <<https://www.portaldobiogas.com/biogas/>> acessado em 31 de maio de 2018

MIERZWA, J. C.; **O uso racional e o reúso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria estudo de caso da Kodak Brasileira**; 2002, 399f., Tese (doutorado), Universidade de São Paulo – Escola Politécnica, São Paulo, 2002

MOLLAH, M. Y. A.; MORKOVSKY P.; GOMES, J. A. G.; KESMEZ, M.; PARGA, J.; COCKE, D. L.; Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation, **Journal os Hazardous Materials**, v. 114, ed. 3, p. 199-210, 2004. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389404004170>> acessado em 05 de abril de 2018

NETO, B. de B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E.; **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**, 4 ed., 414 p., Bookman, Porto Alegre, 2010

NOURI, J.; MAHVI, A. H.; BAZRAFSHAN, E.; Application of electrocoagulation process in removal of zinc and copper from aqueous solutions 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

ORSSATTO, F.; **Otimização do tratamento de efluente de matadouro e frigorífico de suínos pela eletrofloculação e combinação eletrofloculação/coagulação orgânica**; Tese (doutorado em engenharia agrícola) 103 f., Programa de pós-graduação em engenharia agrícola, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Unioeste, Cascavel, 2017

PACHECO, J. W., YAMANAKA, H. T.; **Guia técnico ambiental de abates (bovino e suíno)**, CETESB – São Paulo, 2006, 98 p., (Série P+L). Disponível em: <<http://www.crq4.org.br/downloads/abate.pdf>> acesso em 01/10/2017

PARANÁ, **Resolução CEMA nº 070, de 01 de outubro de 2009**. Dispõe sobre o licenciamento ambiental, estabelece condições e critérios e dá outras providências, para Empreendimentos Industriais.

PAULI, A. R. de; ESPINOZA-QUINONES, F. R.; MÓDENES, A. N.; BORBA, C. E.; THEODORO, P. S.; Aplicação do planejamento experimental no método de eletrocoagulação para a remoção de matéria orgânica de efluentes frigoríficos; **Engevista**, v. 14, n. 3, p. 293-301, 2012. Disponível em: <www.uff.br/engevista/seer/index.php/engevista/article/download/386/210> acessado em 11 de abril de 2018

RAGHAVAN, D. S. S.; QIU, G.; SONG, Y.; TING, Y.; Anaerobic treatment of low-strength wastewater; **Current developments in biotechnology and bioengineering**, capítulo 12, p. 1-25, 2017

RAJESHWARI, K. V., BALAKRISHNAN, M., KANSAL, A., LATA, K., KISHORE, V. V. N.; State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment, **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, 4 ed., p. 135-156, 2000. Disponível em: <http://www.aprekh.org/files/Anaerobic%20reactors_Paper.pdf> acesso em 30/09/2017

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F.; **Planejamento experimental e otimização de processos**, 2 ed., Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, Campinas, 2009

SAFARI, S.; AGHDAM, M. A.; KARIMINIA, H.R.; Electrocoagulation for COD and diesel removal from oily wastewater; **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 13, p. 231-242. Disponível em:

<<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs13762-015-0863-5.pdf>>
 acessado em 12 de abril de 2018

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: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11356-013-2208-6.pdf>> acessado em 12 de abril de 2018

SCHATZMANN, H. C.; **Tratamento avançado de efluentes de frigorífico de aves e o reúso da água**, Dissertação (mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de pós-graduação em engenharia química, Florianópolis, 2009. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/106649/272194.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> acessado em 07 de abril de 2018

SILVA, L. D. C. e; **Avaliação da qualidade final de efluentes de lagoas de estabilização com vistas ao reúso urbano**, Dissertação (mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de pós-graduação em engenharia sanitária, Natal, 2012. Disponível: <http://www.repositorio.ufrn.br:8080/jspui/bitstream/123456789/16003/1/LigianneDC_S_DISSET.pdf> acessado em 07 de abril de 2018

ÜN, Ü. T.; KOPARAL, A. S.; ÖGÜTVEREN, Ü. B.; Hybrid processes for the treatment of cattle-slaughterhouse wastewater using aluminum and iron electrodes; **Journal of Hazardous Materials**; v. 164; p. 580-586, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.08.045>> acessado em 12 de abril de 2018

VALENTE, G. de F. S.; MENDONÇA, R. C. S.; PEREIRA, J. A. M.; The efficiency of electrocoagulation using aluminum electrodes in treating wastewater from a dairy industry; **Ciência Rural**, v. 45, n. 9., 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782015000901713> acessado em 12 de abril de 2018

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: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs10311-013-0434-2.pdf>> acessado em 05 de abril de 2018

VEPSÄLÄINEN, M.; Electrocoagulation in the treatment of industrial waters and wastewaters; **VTT Science**, p. 19-96, 2012. Disponível em: <<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/84897/isbn%209789513879419.pdf?sequence=1>> acessado em 05 de abril de 2018

YETILMEZSOY, K.; ILHAN, F.; SAPCI-ZENGİN, Z.; SAKAR, S.; GANULLU, MT.; Decolorization and COD reduction os UASB pretreated poultry manure wastewater by electrocoagulation process: a post-treatment study; **Journal of Hazardous Materials**; v. 162, p. 120-132, 2009. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18554794>> acessado em 12 de abril de 2018