

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS LONDRINA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

GABRIEL LOURENÇO RODRIGUES

**ELETROCOAGULAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DO EFLUENTE
LÍQUIDO DA INDÚSTRIA CAFEEIRA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2019

GABRIEL LOURENÇO RODRIGUES

**ELETROCOAGULAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DO EFLUENTE
LÍQUIDO DA INDÚSTRIA CAFEEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Joseane Débora Peruço
Theodoro

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Edilaine Regina Pereira

LONDRINA

2019

10/02/2021

SEI/UTFPR - 1754785 - Graduação: Termo de Aprovação TCC Aluno



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEP. ACADEMICO DE AMBIENTAL-LD

TERMO DE APROVAÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

ELETROCOAGULAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DO EFLUENTE LÍQUIDO DA INDÚSTRIA CAFEIEIRA

Por

GABRIEL LOURENÇO RODRIGUES

Monografia apresentada às 9 horas 00. min. do dia 25 de novembro de 2020. como requisito parcial, para conclusão do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação e conferidas, bem como achadas conforme, as alterações indicadas pela Banca Examinadora, o trabalho de conclusão de curso foi considerado APROVADO.

Banca examinadora:

Prof. Ajadir Fazolo	Membro
Prof. Rafael Montanhini Soares de Oliveira	Membro
Prof. Joseane Debora Peruço Theodoro	Orientador
Prof. Orlando de Carvalho Júnior	Professor(a) responsável TCCII

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e meus irmãos por todo seu amor e por não medirem esforços em prol do meu futuro, sem eles nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus por nunca ter me abandonado e ter me amparado desde meu nascimento, em todos os momentos.

Aos meus pais, Carlos Alberto Oliveira Rodrigues e Fabiana Lourenço Leite Rodrigues, por todo o suporte, amor, confiança e por estarem sempre do meu lado, me apoiando em todas as situações, difíceis ou não, desde cedo. Sem eles, nada disso seria possível.

Aos meus irmãos, Guilherme Lourenço Rodrigues e Felipe Lourenço Rodrigues, por serem os melhores irmãos possíveis, estando sempre do meu lado e me apoiando em minhas decisões.

Aos meus amigos e companheiros de graduação, Arlete Alves Pereira, Vinícius Alexandre de Almeida Cruz, Jéssica Tiossi Naka, Caroline Yukari Takiguchi, Thiago Moreschi, Janaína Casado Rodrigues da Silva e Johvanny Lourenço Mendonça, que estiveram comigo nessa longa trajetória e sem eles, o caminho seria bem mais longo.

Agradeço aos Profs. Drs. Marcelo Eduardo Freres Stipp e Maurício Moreira dos Santos, por todo suporte e orientação durante meu período de estágio.

Agradeço à Profa. Dra. Joseane Débora Peruço Theodoro pela orientação e apoio ao longo deste trabalho.

Agradeço à Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira pela coorientação e por me ajudar em tudo o que foi necessário.

Agradeço a Universidade Tecnológica Federal do Paraná por me proporcionar todo o conhecimento necessário para minha formação acadêmica ao longo desses anos de graduação e aos professores que ajudaram em minha caminhada me fazendo uma pessoa melhor.

RESUMO

RODRIGUES, G. L. Eletrocoagulação aplicada ao tratamento do efluente líquido da indústria cafeeira. 2020. 53 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Com o crescimento do efluente gerado pela indústria do café, devido a sua grande e contínua exportação, é necessário investigar formas alternativas para o seu tratamento. A eletrocoagulação, que utiliza eletrodos e energia elétrica com a finalidade de coagular as partículas poluentes é uma dessas alternativas. Este trabalho teve como objetivo aplicar o processo da eletrocoagulação no tratamento do efluente da indústria cafeeira com e sem a aplicação de cloreto de sódio (NaCl) para verificar qual o método e tempo ideal para a melhor redução de turbidez, sólidos totais dissolvidos e para verificar o comportamento da condutividade elétrica, pH e por fim avaliar seu custo de operação levando em consideração o consumo de energia elétrica e dos eletrodos. Foram realizados ensaios, com e sem NaCl, ao longo de 40 minutos, utilizando eletrodos de alumínio com o efluente da indústria do café. O primeiro ensaio após a eletrocoagulação, sem NaCl, mostrou valores de 426 uT de turbidez, 207 mg.L⁻¹ de sólidos totais dissolvidos, 0,87 mS.cm⁻¹ de condutividade elétrica e 7,10 de pH. Já no segundo ensaio, com NaCl, gerou valores de 16,1 uT de Turbidez, 618 mg.L⁻¹ de sólidos totais dissolvidos, 11,89 mS.cm⁻¹ de condutividade elétrica e 8,10 de pH. Verificou-se que a presença de NaCl auxiliou na redução da turbidez. Houve um aumento considerado na condutividade elétrica e o pH manteve-se no mesmo patamar. Houve um maior desgaste por parte dos eletrodos de alumínio na presença de NaCl e também um aumento considerável no consumo de energia elétrica. Pode-se concluir que os melhores valores obtidos foram com a presença de NaCl, resultando em um custo total de R\$ 17,837 por m³.

Palavras-chave: Tratamento de efluente; eletrocoagulação; indústria do café.

ABSTRACT

RODRIGUES, G. L. Eletrocoagulation applied to the treatment of liquid effluente from a coffee industry. 2020. 53 p. Undergraduate Thesis (Environmental Engeneering). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

With the growth of the effluent generated by the coffee industry, due to its large and continuous export, it is necessary to investigate alternative ways for its treatment. Electrocoagulation, which uses electrodes and electrical energy to coagulate polluting particles is one of those alternatives. This work aimed to apply the electrocoagulation process in the treatment of the coffee industry effluente, with and without the application of sodium chloride (NaCl), in order to verify the ideal method and time for the best reduction in turbidity, total dissolved solids and to verify the behavior of the electrical conductivity, pH and finally evaluate its operating cost taking into account the consumption of electricity and electrodes. Tests were carried out, with and without NaCl, over 40 minutes, using aluminum electrodes with the effluent from the coffee industry. The first test after the eletrocoagulation, without the use of NaCl, showed the values of 426 uT of turbidity, 207 mg.L-1 of total dissolved solids, 0.87 mS.cm⁻¹ of electrical conductivity and 7.10 of pH. In the second test, with NaCl, it generated values of 16.1 uT of Turbidity, 618 mg.L-1 of total dissolved solids, 11.89 mS.cm-1 of electrical conductivity and 8.10 of pH. It was found that the presence of NaCl helped to reduce turbidity. There was a considerable increase in electrical conductivity and the pH remained at the same level. There was a greater wear on the part of the aluminum electrodes in the presence of NaCl and also a marked increase in the consumption of electrical energy. It can be concluded that the best values obtained were with the presence of NaCl, which resulted on a total cost of R\$ 17,837 per m³.

Palavras-chave: Effluent treatment; eletrocoagulation; coffee industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processos de uma Indústria Cafeeira.	9
Figura 2 - Diagrama de um reator de eletrocoagulação de bancada com dois eletrodos.	12
Figura 3 - Diagrama de um reator de eletrocoagulação de bancada com dois eletrodos em paralelo.....	13
Figura 4 - Diagrama de um reator de eletrocoagulação de bancada com dois eletrodos em série.....	14
Figura 5 - Localização da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Londrina.	16
Figura 6 - Localização do Bloco S da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. ...	17
Figura 7 - Esquema do reator de eletrocoagulação.	18
Figura 8 - Sistema de Eletrodos de alumínio.....	19
Figura 9 - Comparação dos valores de Turbidez.	24
Figura 10 - Comparação dos valores de STD.	26
Figura 11 - Comparação dos valores de Condutividade Elétrica.....	28
Figura 12 - Comparação dos valores de pH.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção Mundial de Café dos maiores produtores do mundo.	7
Tabela 2 – Composição média do efluente do café.	10
Tabela 3 - Padrões de lançamento de efluentes para corpos hídricos de classe 2.....	15
Tabela 4 - Parâmetros, equipamentos e procedimentos.....	20
Tabela 5 - Planejamento das análises.	20
Tabela 6 - Caracterização do efluente pré-tratamento.	23
Tabela 7 - Valores de turbidez.	24
Tabela 8 - Valores de Sólidos Totais Dissolvidos.....	26
Tabela 9 - Valores de Condutividade Elétrica.	27
Tabela 10 - Valores de pH.....	29
Tabela 11 - Consumo dos Eletrodos.	31
Tabela 12 - Corrente Elétrica.	31
Tabela 13 - Consumo de Energia Elétrica.....	32
Tabela 14 - Custo de Operação.	32

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APHA	American Public Health Association
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EC	Eletrocoagulação
NTU	Unidade Nefelométricas de Turbidez
OMS	Organização Mundial da Saúde
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampére
A.m ²	Ampére por metro quadrado
cm	Centímetros
C.mol ⁻¹	Coulombs por mol
Ca ²⁺	Íon Cálcio
Cl ⁻	Íon Cloreto
°C	Grau Célsius
C _{oper}	Custo total de operação
C _{energ}	Consumo de energia elétrica
C _{elet}	Consumo do eletrodo
F	Constante de Faraday
g	Gramas
g.C ⁻¹	Gramas por Coulomb
g.L ⁻¹	Gramas por Litro
g.mol ⁻¹	Gramas por mol
h	Horas
km	Quilômetro
kg.m ⁻³	Quilograma por metro cúbico
kWh	Quilowatt-hora
kWh.m ⁻³	Quilowatt-hora por metro cúbico
L	Litro
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
min	Minuto
mg	Miligrama
mg.L ⁻¹	Miligrama por litro
mL	Mililitro
mA.cm ²	Miliampére por centímetro quadrado

NaCl	Cloreto de Sódio
O ₂	Gás oxigênio
R\$.m ³	Reais por metro cúbico
R\$.kWh ⁻¹	Reais por quilowatt-hora
R\$.kg Al ⁻¹	Reais por quilograma de alumínio
t	Tempo
uT	Unidade de turbidez
V	Volts
Wh.m ⁻³	Watt-hora por metro cúbico
μS.cm ⁻¹	Micro Siemens por centímetro
§	Parágrafo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	144
2 OBJETIVOS.....	6
2.1 OBJETIVO GERAL.....	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	7
3.1 INDÚSTRIA DE CAFÉ NO BRASIL	7
3.2 ETAPAS DOS PROCESSOS PRODUTIVOS DA INDÚSTRIA CAFEIEIRA	8
3.3 EFLUENTES LÍQUIDOS DA INDÚSTRIA CAFEIEIRA.....	10
3.4 TRATAMENTOS APLICADOS AOS EFLUENTES DA INDÚSTRIA CAFEIEIRA ...	11
3.5 ELETROCUAGULAÇÃO	12
3.5.1 Presença de NaCl	14
3.6 LEGISLAÇÃO.....	15
4 MATERIAIS E MÉTODOS	16
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	16
4.2 AMOSTRAGEM	18
4.3 ENSAIOS DE ELETROCOAGULAÇÃO	18
4.3.1 Reator.....	18
4.3.2 Análise dos Parâmetros de Qualidade	19
4.3.3 Adição de Cloreto de Sódio	20
4.3.4 Planejamento.....	20
4.3.5 Procedimento para cálculo do custo de operação	21
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE COLETADO	23
5.2 TRATAMENTO DO EFLUENTE DO CAFÉ POR ELETROCOAGULAÇÃO	24
5.2.1 Remoção da Turbidez	24
5.2.2 Remoção dos Sólidos Totais Dissolvidos	25

5.2.3 Variação da Condutividade Elétrica.....	27
5.2.3 Variação do pH.....	29
5.3 ANÁLISE DO CUSTO DO PROCESSO	30
5.3.1 Desgaste dos Eletrodos.....	30
5.3.2 Consumo de Energia Elétrica	31
5.3.3 Custo do Processo de Eletrocoagulação.....	32
6 CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS.....	35

1 INTRODUÇÃO

As indústrias de café são muito importantes para a economia brasileira. Em 2018, a safra brasileira foi de 59,90 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado, cultivados nos estados de São Paulo, Rondônia, Paraná, Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo, Mato Grosso, Pará, Amazonas e Goiás, tornando o país o maior produtor e exportador de café do mundo. Além disso, foi o quinto maior produto exportado, movimentou cerca de US\$ 5,2 bilhões em 2017 (CONAB, 2018) é a segunda *commodity* mais vendida no mundo depois do petróleo (FERRAREZ, 2020).

Com essa grande produção de café solúvel, há uma enorme geração de efluentes industriais gerados que, se não tratados, podem trazer consequências severas para o meio ambiente.

A indústria cafeeira contribui para a geração de grande quantidade de efluente líquido pelo processo de extração do café solúvel e limpeza de maquinário. Esse efluente gerado é constituído de borra de café, óleos, nutrientes, é rico em material orgânico e alto nível de teor de sólidos (GEA, 2017).

A grande quantidade de água usada na produção do café solúvel e limpeza caracteriza estas indústrias como uma das principais geradoras de efluentes líquidos do mundo. O volume de água utilizado está entre 80 a 93 m³ ton⁻¹ de café em grão (SHANMUKHAPPA et al., 1998) e metade deste valor torna-se efluente líquido (ZAYAS et al., 2007).

O setor industrial está entre os maiores causadores de impactos ambientais da atualidade, pela poluição dos corpos hídricos, devastação de florestas, poluindo o ar, e pela fabricação de produtos (CAJAZEIRA, 2011).

Por esse motivo, é necessário que seja realizado um tratamento adequado desse efluente e que sua disposição final seja feita de maneira correta bem como estar dentro dos padrões de emissão previstos pela Resolução n° 430, de 13 de maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2011).

Diante dessa temática, o presente trabalho de conclusão de curso, tem como objetivo aplicar o processo de eletrocoagulação para o tratamento do efluente líquido

proveniente da indústria cafeeira e verificar a eficiência deste tratamento pela remoção ou redução dos parâmetros indicativos da qualidade do efluente tratado.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo geral, verificar a eficiência do tratamento de um efluente da indústria cafeeira através do uso do processo de eletrocoagulação empregando eletrodos de alumínio

2.2 objetivos específicos

- Utilizar um reator com eletrodos de alumínio, para aplicar o processo de eletrocoagulação;
- Analisar o efeito da eletrocoagulação na remoção dos parâmetros turbidez, sólidos totais dissolvidos e acompanhar os parâmetros pH e condutividade elétrica;
- Identificar a eficiência na redução dos parâmetros analisados e compará-los com as Resoluções N° 357/2005 e N° 430/2011 do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) para verificar sua disposição final;
- Calcular o custo de operação do processo da eletrocoagulação considerando o consumo de energia elétrica, a compra dos materiais utilizados e o desgaste destes durante os processos de operação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 INDÚSTRIA DE CAFÉ NO BRASIL

Nos últimos vinte anos, o Brasil vem exportando cada vez mais café. Os dados apontam que, no ano de 2000, a demanda foi de 105,50 milhões de sacas de café, desse valor, a contribuição do Brasil foi de 31,1%. Em 2008, esse valor já aumentou, com uma produção de 132,96 milhões de sacas e uma participação de 37,0%. Por fim, no ano de 2018, o consumo foi de 164,64 milhões de sacas e a participação brasileira foi de 37,7% (EMBRAPA, 2019).

O Brasil é o país com maior extensão territorial da América Latina, com uma área de 8.514.876 km² (IBGE, 2019). Com esse grande território juntamente com o crescimento demográfico, a indústria do café necessita de grandes volumes de água nos processos de beneficiamento tornando uma das principais geradoras de efluentes industriais do país (VILLA et al., 2007).

A comparação da produção mundial de café nos principais países, do ano de 2008 a 2017 pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 - Produção Mundial de Café dos maiores produtores do mundo por milhão de toneladas.

Países	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017*	Média
Brasil	45.992	39.470	48.095	43.484	50.826	49.152	45.342	43.235	51.369	44.774	46.173,9
Vietnã	16.405	18.438	17.285	20.000	26.500	23.402	27.610	26.500	28.737	25.500	23.037,7
Colômbia	12.516	8.664	8.098	8.523	7.652	99.27	12.163	13.339	14.009	14.500	10.939,1
Mundo	122.913	134064	127.783	139.600	147.904	149.740	152.130	148.724	151.438	151.624	142.592

Legenda: (*) estimativa.

Fonte: adaptado de OIC/ CONAB (BRASIL, 2016).

Existem duas variedades de café comercializadas pelo Brasil, a Robusta (*Coffea canephora*) e a Arábica (*Coffea arabica*). Até a década de 90, após a sua colheita, o café brasileiro podia ser processado de duas formas: via seca, produzindo o Café Natural com acidez moderada a baixa com doçura, aroma e polpa bem acentuadas; e por via úmida, gerando o Café Despolpado, com maior acidez e aroma menos pronunciado (EMBRAPA, 2016)

Posteriormente, surgiu o Café Descascado, obtido após a retirada de somente a casca, mantendo a mucilagem aderida ao pergaminho, possibilitando obter um produto final com as características semelhantes ao do Café Natural, embora este seja pouco consumido.

Deste modo, com essa grande produção anual, a indústria do café consome uma grande quantidade de água para suas atividades, tanto para o beneficiamento do café quanto para a limpeza, tornando-a uma das maiores geradoras de efluentes industriais (MACHADO et al., 2002).

Estima-se que o volume de água necessário para a produção de uma tonelada de café limpo é de cerca de 93m³ para a variedade Robusta e de 80 m³ para a variedade Arábica. Deste modo, o efluente gerado a partir dessa atividade é ácido e possui concentrações elevadas de sólidos orgânicos dissolvidos e suspensos, cujo tais causam danos ao meio ambiente (SHANMUKHAPPA et al.; 1998).

Além disso, há uma coloração amarronzada no efluente do café, atribuída as melanoidinas que consistem em grupos ligantes como polissacarídeos, peptídeos, taninos e outras combinações (MORALES et al.; 2005).

Dentre os países produtores de café da América Central e África, o processamento via úmida é bastante comum devido as aroma e bebida suaves que este processamento proporciona. No entanto, embora o Brasil tenha cerca de 90% de sua produção utilizando a via seca, há uma tendência dos produtores de optarem pelo método úmido, pois agrega valor e sabor ao produto oferecido devido à alta qualidade da bebida (ALMEIDA et al.; 2006)

3.2 ETAPAS DOS PROCESSOS PRODUTIVOS DA INDÚSTRIA CAFEIEIRA

O processo tradicional na indústria cafeeira inicia-se na colheita dos grãos, tendo uma pré-seleção manual e então passam para a etapa de limpeza (peneiramento, ventilação, separador), lavagem e a separação, onde são retiradas as impurezas, como folhas, terra, rochas, onde utiliza-se lavador ou separador mecânico. Em seguida há o processo de secagem, beneficiamento (retirada de cascas, separação de grãos, secagem final), processamento, onde o café verde é transformado em marrom devido à

elevadas temperaturas e moagem. Por fim, há o empacotamento e rotulagem para o comércio (BASSETTO et al.; 2016)

A Figura 1 mostra os diferentes processos de uma indústria cafeeira:

Figura 1 - Processos de uma Indústria Cafeeira.



Fonte: Pimenta, 2018.

O processo da secagem por via úmida consiste na secagem dos frutos sem casca do café e/ ou sem mucilagem, originando os grãos de café lavados/ descascados e despulpados.

Este despulpamento, consiste na remoção da casca do fruto maduro utilizando um descascador mecânico e então há uma fermentação da mucilagem e por fim a lavagem dos grãos. Além disso, este tipo de preparo, permite uma melhor otimização dos terreiros, secadores e unidades de armazenamento por causa da redução de volume e do tempo para completar a seca (EMBRAPA, 2016)

Após a lavagem e separação, o café é então descascado em descascadores mecânicos por fricção,

Segundo Silva (2009), o processamento por via úmida necessita o uso de equipamentos específicos e uma grande quantidade de água é utilizada nesse processo. Deste modo, este é a parte do beneficiamento que mais utiliza esse recurso.

3.3 EFLUENTES LÍQUIDOS DA INDÚSTRIA CAFEEIRA

A composição do efluente da indústria do café é constituída por grandes volumes de água e é rico em matéria orgânica, por isso o grande desafio de melhorar esse efluente. Segundo Frasson (2011), parte deste é gerado na higienização das máquinas e nas linhas de extração de café, secagem e concentração;

Na Tabela 2, são apresentados alguns parâmetros físico-químicos que são geralmente encontrados nos efluentes líquidos da indústria do café.

Tabela 2 – Composição média do efluente do café.

Autores	Murthy et al. (2004)	Selvamurugan et al. (2010)	Frasson (2011) – BR*	Kulandaivelu e Bhat (2012)	Rossmann et al. (2012)	Paleari (2014) – BR*	Matos e Lo Monaco (2015)
DQO (mg L ⁻¹)	6240	6420 - 8480	8000	24300	17244	5700	3430 - 8000
DBO (mg L ⁻¹)	3600	3800 – 4780	3500	15850	8005	2850	1840 - 5000
pH	4,2	3,9 – 4,2	8,7	4,2	4,7	11,5	3,5 – 5,2

Nota 1: BR* (Efluente da Indústria Brasileira)

Fonte: Pimenta, 2018

Com base nesses valores, deve-se respeitar a Resolução CONAMA N° 357 e CONAMA N° 430 quando se diz respeito ao lançamento de um efluente em um corpo d'água, para isso, deve-se atender aos padrões de qualidade pré-estabelecidos para o corpo receptor.

Deste modo, deve-se atender os requisitos:

- pH entre 5 e 9;
- Temperatura inferior a 40 °C;
- Materiais sedimentáveis até 1 mL.L⁻¹ em teste de 60 min em cone *Innhoff*;
- Gestão de lançamento de vazão máxima de 1,5 vezes a vazão média da produção poluidora;
- Óleos minerais até 20 mg. L⁻¹;
- Óleos vegetais e gorduras animais até 50 mg. L⁻¹;
- Demanda Química de Oxigênio e DBO₅ dias, 20 °C com e remoção mínima de 60%.

Como este efluente da indústria de café é ácido e possui matéria orgânica como frutose, glicose e proteínas (HADDIS, 2008; KONDO et al.; 2014), não é tarefa fácil fazer com que o efluente esteja dentro de todos os padrões necessários de acordo com a legislação vigente, por isso estudos são tão necessários.

3.4 TRATAMENTOS APLICADOS AOS EFLUENTES DA INDÚSTRIA CAFEEIRA

Como o efluente líquido da indústria do café possui uma alta concentração de matéria orgânica biodegradável, o tratamento tipicamente utilizado é do tipo biológico, sendo bastante eficiente em grande parte dos poluentes além de reduzir consideravelmente os níveis de matéria orgânica (GONÇALVES apud CENTURIÓN & GUNTHER, 1976).

Segundo Gonçalves (2017), dos tratamentos aeróbicos mais utilizados, pode-se destacar os processos de lodos ativados, tratamento em lagoas e reatores em bateladas. Nos anaeróbicos utilizam-se os reatores de manta de lodo, reatores em batelada e filtros.

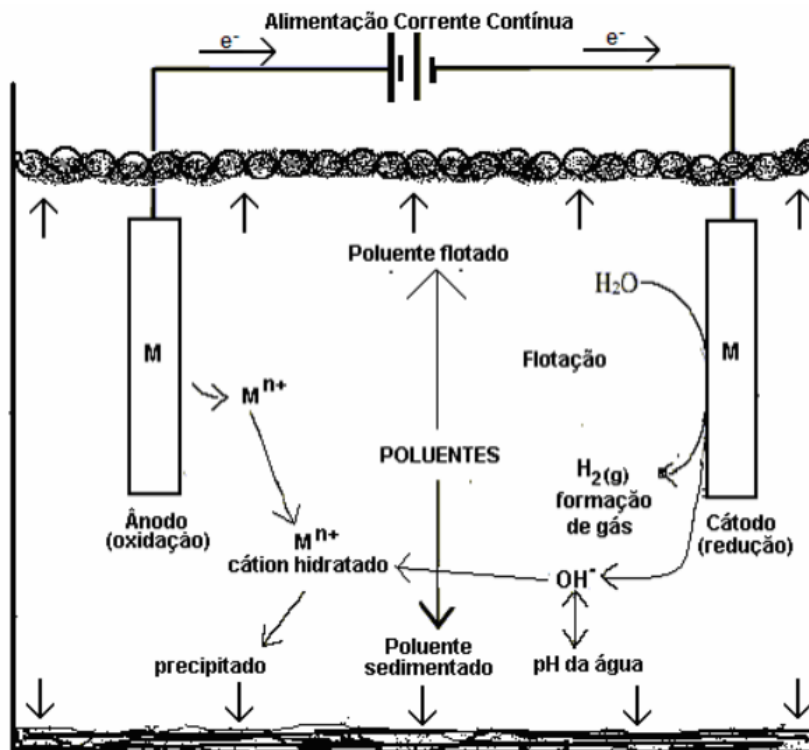
Outro método utilizado para o tratamento desse efluente, envolve a utilização do tratamento primário cuja função seria remover os sólidos, gorduras e óleos, seguido do tratamento secundário que removeria a matéria orgânica e, caso necessário, tratamento terciário como finalização do processo (ANDRADE, 2011).

Outra técnica que pode ser utilizada para o tratamento de um efluente da indústria do café é a eletrocoagulação. Segundo Alexandre et al. (2014), a eletrocoagulação tem se destacado entre as técnicas não convencionais de tratamento de efluentes devido a sua alta eficiência operacional.

3.5 ELETROCUAGULAÇÃO

A eletrocoagulação ou eletrofloculação (Figura 2) é uma técnica que consiste no uso de um reator com eletrodo, que possui um catodo e um anodo formados por placas metálicas, onde são reduzidas e oxidados, respectivamente, ao receberem uma diferença de potencial elétrico gerada por uma fonte externa. Além disso, microbolhas de oxigênio são formadas, carregando as partículas poluentes presentes no efluente para a superfície e então estas podem ser removidas por métodos mais convencionais, como raspagem ou sucção (FORNARI, 2007).

Figura 2 - Diagrama de um reator de eletrocoagulação de bancada com dois eletrodos.



Fonte: Adaptado de MOLLAH et al. (2004).

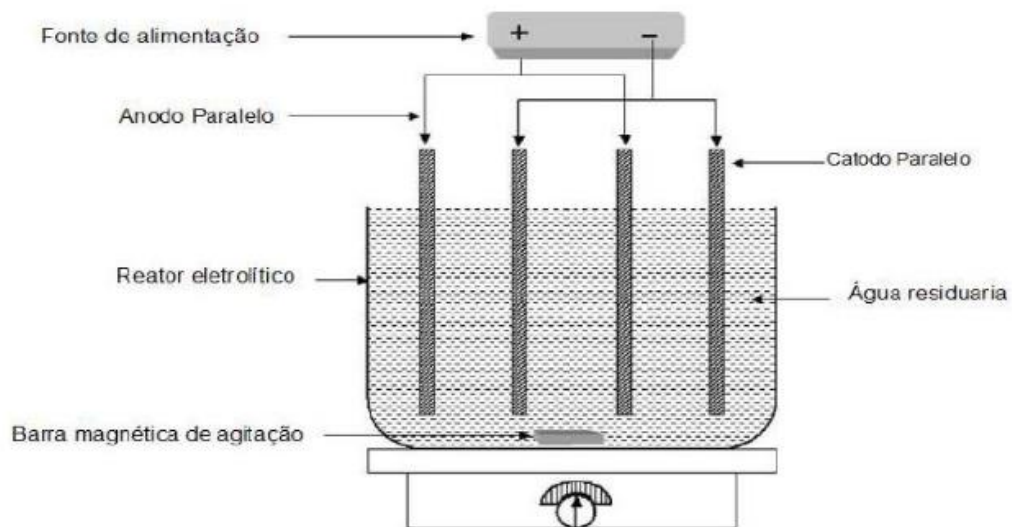
Na eletrocoagulação não é necessário a utilização de coagulantes (químicos ou biológicos) pois estas se formam no local pela oxidação eletrolítica que acontece no anodo dentro reator (FLECK et al. 2013).

Segundo Neto et al. (2011), a eletrocoagulação ocorre, em sua essência, em três processos. Primeiramente, gera-se o coagulante pela oxidação do anodo metálico de sacrifício. Com isso, após a geração dos cátions, há a reação deles com as moléculas de água, formando poli-hidróxidos e hidróxidos ao mesmo tempo que ocorre a eletrólise da água e também a formação das microbolhas de oxigênio presentes no anodo e hidrogênio no catodo que por fim carregarão o material, que sofreu a floculação, para a superfície.

Na próxima etapa, ocorre a criação de floculos pela adsorção das partículas coloidais formados pela adsorção dos hidróxidos formados. Por fim, na terceira e última etapa, ocorre a flotação devido à formação das microbolhas geradas pela hidrólise da água (NETO et at., 2011).

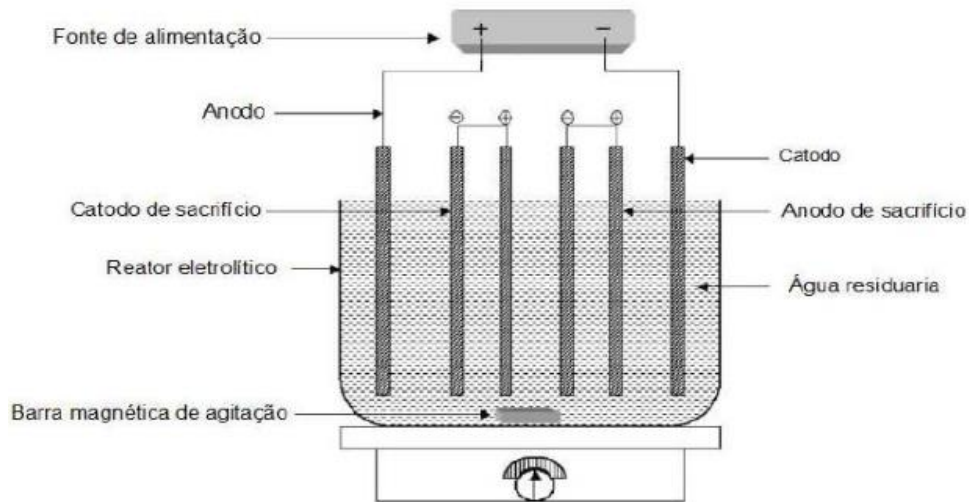
Modelos de reator de eletrocoagulação de bancada pode ser visto nas Figuras 3 e 4:

Figura 3 - Diagrama de um reator de eletrocoagulação de bancada com dois eletrodos em paralelo.



Fonte: Adaptado de MOLLAH et al. (2004).

Figura 4 - Diagrama de um reator de eletrocoagulação de bancada com dois eletrodos em série.



Fonte: Adaptado de MOLLAH et al. (2004).

Os reatores também podem variar tanto no material utilizado quanto na sua forma geométrica. Com isso, os reatores podem ser muito versáteis, ou seja, não há reator dominante, dependendo do processo, certos reatores apresentarão melhores resultados e terão vantagens e desvantagens (THEODORO, 2010).

3.5.1 Presença de NaCl

O sal, é utilizado geralmente com a finalidade de aumentar a condutividade elétrica do efluente a ser tratado ou da água e deve-se utilizar pelo menos 20% de concentração de NaCl para o tratamento de efluentes, para garantir um bom funcionamento da eletrocoagulação (CHEN, 2004).

De acordo com Nascimento (2018), o processo de eletrocoagulação tem uma eficiência que depende da condutividade elétrica e a utilização do NaCl favorece essa reação pois tem a capacidade de aumentar a corrente elétrica no meio, facilitando os processos químicos.

3.6 LEGISLAÇÃO

A Resolução N° 357 de 2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), classifica os corpos hídricos para o seu enquadramento além de estabelecer os padrões e condições de lançamento de efluentes (BRASIL, 2005).

Já a Resolução N° 430 de 2011 do CONAMA mostra os padrões e condições de lançamento de efluentes além de alterar e complementar a Resolução N° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2011).

Para o seguinte trabalho, utilizou-se um rio de água doce de classe I como alvo do lançamento deste efluente após tratado. Os valores padrões de lançamento para os parâmetros analisados podem ser verificados na Tabela 3.

Tabela 3 - Padrões de lançamento de efluentes para corpos hídricos de classe 2.

Variáveis	CONAMA 357/2005*	CONAMA 430/2011**
Turbidez	100	-
Sólidos totais dissolvidos	-	-
Condutividade elétrica	-	-
pH	6 a 9	5 a 9

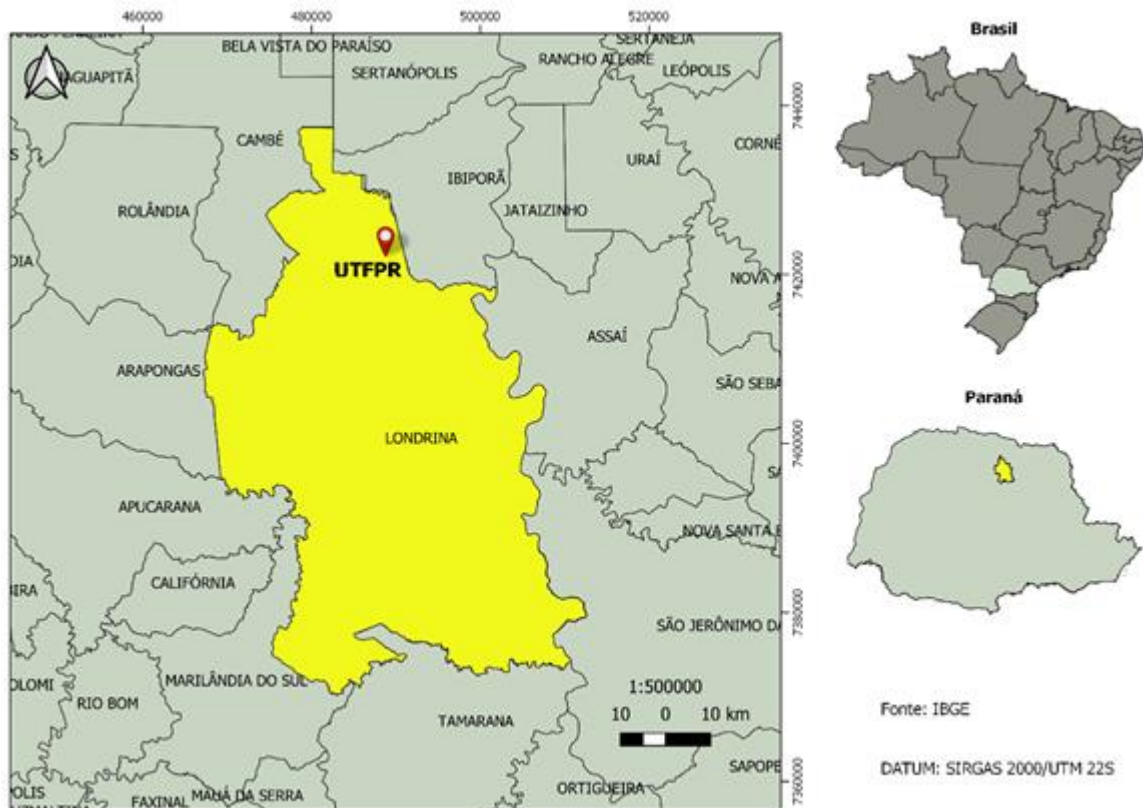
Fonte: (1) *Adaptado de CONAMA (2005) – (2) **Adaptado de CONAMA (2011)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Este trabalho foi realizado com dados de amostras do efluente líquido de uma indústria de café e seu tratamento foi realizado no Laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que está localizada no município de Londrina, com endereço: Estrada dos Pioneiros, 3131 – Londrina/PR, entre as coordenadas $23^{\circ} 18' 32,977''$ Sul e $51^{\circ} 6' 59,903''$ Oeste. (Figura 5).

Figura 5 - Localização da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Londrina.



Fonte: Autoria Própria (2019).

O local cujas análises foram efetuadas foi o Laboratório de Recursos Hídricos, que está localizado no bloco S do campus Londrina da UTFPR, podendo ser localizada na Figura 6.

Os resultados foram obtidos por orientados de iniciação científica de Engenharia Ambiental, ministrado pela Prof^a. Dr^a. Joseane Débora Peruço Theodoro e as análises de dados foram feitas ao longo deste trabalho de conclusão de curso.

Figura 6 - Localização do Bloco S da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.



Fonte: Fotografia adaptada de Canziani (2017) – Repositório UTFPR – Campus Londrina.

Notas:	F: Bloco F (Almoxarifado)	O: Quadra Poliesportiva
A: Bloco A	I: Biblioteca	P: Bloco P (Saneamento)
B: Bloco B	K: Bloco K	Q: Bloco Q (Manutenção)
D: Bloco D (Zircônia)	L: Laboratórios de Pesquisa	S: Bloco S
E: Bloco E	N: Restaurante Universitário	

4.2 AMOSTRAGEM

Foi coletado 20 litros do efluente líquido bruto de uma indústria do café onde e armazenados em um galão de plástico de 20 litros, que fora aclimatado antes do armazenamento final, e levado ao laboratório de Recursos Hídricos, para a realização dos experimentos.

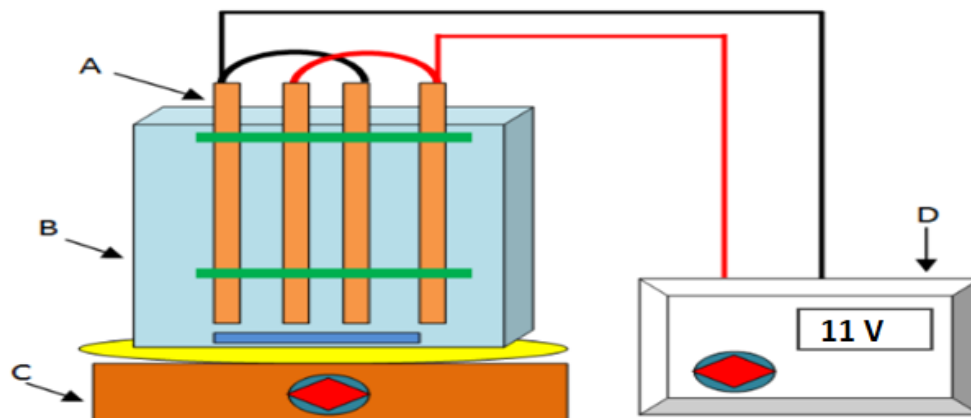
4.3 ENSAIOS DE ELETROCOAGULAÇÃO

4.3.1 Reator

Utilizou-se, para a eletrocoagulação, um reator de com placas de alumínio e foi realizado o experimento com e sem a presença de cloreto de sódio, afim de avaliar se há ocorrência de melhorias.

O Reator utilizado seguiu o modelo fornecido por Theodoro (2017), contendo um agitador magnético, um conjunto de eletrodo (alumínio) que foi montado para realizar os tratamentos, uma fonte de corrente contínua de 11V e um recipiente retangular de acrílico, com as dimensões de 12 cm de comprimento por 12 cm de largura e 20 cm de altura. O esquema do reator pode ser verificado na Figura 7.

Figura 7 - Esquema do reator de eletrocoagulação.



Fonte: Theodoro (2017).

Onde A) Sistema de eletrodos monopolares; B) Recipiente para o reator; C) Agitador magnético; D) Fonte de corrente elétrica.

O eletrodo foi constituído por quatro placas de alumínio, com dimensões de 8 cm de comprimento por 16 cm de altura e 0,03 cm de espessura. O eletrodo teve suas placas conectadas em paralelo fixadas por parafusos de PVC para manter a equidistância destes. O esquema das placas pode ser na Figura 8.

Figura 8 - Sistema de Eletrodos de alumínio.



Fonte: Martins (2017).

A fonte utilizada para os experimentos tinha uma tensão de 11 Volts e corrente contínua.

4.3.2 Análise dos Parâmetros de Qualidade

Para realizar o tratamento do efluente e analisar os parâmetros (Cor aparente, pH, Condutividade Elétrica, Turbidez, e Sólidos Dissolvidos Totais), coletou-se, do reator, que ocorreu a eletrocoagulação, amostras de 100 mL em intervalos de 10 minutos (10, 20, 30, 40 minutos). A leitura dos parâmetros foi realizada 10 minutos após a coleta para permitir que as impurezas presentes sedimentassem.

Os equipamentos utilizados bem como seu procedimento podem ser verificados na Tabela 4. Os parâmetros analisados seguirão a metodologia prevista pelo Standard Methods of Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012).

Tabela 4 - Parâmetros, equipamentos e procedimentos.

Parâmetro	Equipamento	Procedimento
Turbidez	Turbidímetro Policontrol	2130
pH	pHmetro mPA-210	4500 H+ B
Condutividade	Condutivímetro Mca 150	2510 B
S.T. Dissolvidos	Meter TDS	Leitura Direta

Fonte:(APHA, 2012).

4.3.3 Adição de Cloreto de Sódio

Adicionou-se o cloreto de sódio (NaCl), respeitando os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357 (BRASIL, 2005).

Foi utilizado uma massa de 1,959 g com uma concentração de 0,9795 kg/m³ no início da eletrocoagulação, com isso, foi possível verificar a eficácia do NaCl.

4.3.4 Planejamento

A Tabela 5 apresenta o planejamento que foi utilizado para a medição dos parâmetros analisados após o processo de eletrocoagulação.

Tabela 5 - Planejamento das análises.

Tempo (min)	Turbidez (uT)		pH		Condutividade Elétrica (mS.cm ⁻¹)		S.T.D. (ppm)	
	Sem NaCl	Com NaCl	Sem NaCl	Com NaCl	Sem NaCl	Com NaCl	Sem NaCl	Com NaCl
10								
20								
30								
40								

Fonte: Autoria Própria (2020).

4.3.5 Procedimento para cálculo do custo de operação

São os parâmetros associados ao processo operacional de eletrocoagulação, calculados. A massa do eletrodo a ser consumida (ou desgastada) pode ser calculada pela Equação 1.

$$M_{el} = \frac{i \times t \times M}{F \times n} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

i = corrente elétrica (A);

t = tempo de aplicação da corrente ou tempo do processo (h);

M = massa molar do alumínio (g/mol);

n = número de elétrons envolvidos na reação de oxidação do ânodo;

F = constante de Faraday ($F = 9,65 \times 10^4$ C/mol).

O tempo para que ocorra o desgaste do eletrodo pode ser calculado pela Equação 2.

$$T = \frac{M_{el}}{\alpha \times i} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

T = tempo para que ocorra o desgaste M_{el} (h);

α = equivalente eletroquímico (g/Ah);

i = corrente elétrica (A).

A Equação 3 nos dá a Densidade de corrente

$$\delta = \frac{i}{A_{anodo}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

δ = densidade de corrente (A/m²);

i = corrente elétrica (A);

A_{anodo} = área total dos ânodos (m²).

O consumo de energia elétrica durante o processo da eletrocoagulação é calculado pela Equação 4.

$$C = \frac{U \times i \times t}{v} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

C = consumo de energia (Wh/m³);

U = tensão elétrica aplicada (V);

i = corrente elétrica (A);

t = tempo de aplicação da corrente ou tempo do processo (h);

v = volume do efluente que foi tratado (m³).

Por fim, para o cálculo do custo operacional, utiliza-se a Equação 5.

$$C_{oper} = a \times C_{energ} + b \times C_{elet} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo

C_{oper} = custo total da operação do sistema (R\$/m³);

a = custo de energia elétrica (R\$/kWh);

C_{energ} = consumo de energia elétrica (kWh/m³);

b = custo dos eletrodos (R\$/kg de alumínio);

C_{elet} = consumo do eletrodo (kg/m³ água tratada).

Calcula-se o custo com a finalidade de comparar os gastos do processo e verificar a viabilidade de aplicação do mesmo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE COLETADO

De acordo com a Tabela 6, pode-se observar os valores dos parâmetros de caracterização do efluente da indústria de café antes do processo da eletrocoagulação.

Tabela 6 - Caracterização do efluente pré-tratamento.

Parâmetro	Resultado
Turbidez (uT)	253
Sólidos totais dissolvidos (mg.L ⁻¹)	198
Condutividade elétrica (mS.Cm ⁻¹)	0,81
pH	5,79

Fonte: Autoria Própria (2020).

Com base nos valores obtidos, pode-se averiguar que este efluente não estava em condições de lançamento nos rios de classe I de acordo com o CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005), cujo estabelece os padrões requeridos para tal.

Conforme a Tabela 6, observa-se que a turbidez do efluente bruto do café tem um valor de 253 uT, o que ultrapassa muito o valor máximo permitido, de 100 uT.

Não há um valor recomendado para o máximo permitido de sólidos totais dissolvidos para corpos hídricos de classe I, mas para classe II o máximo permitido é de 500 ppm, então utilizou-se esse parâmetro. Como o resultado obtido foi 198, estaria dentro dos conformes.

A condutividade elétrica também não apresenta um valor máximo permitido, mas é necessário que esta não seja elevada.

Por fim, o pH deve estar entre 6 e 9, e como o valor bruto deu 5,79 é necessário tratamento para lançamento no corpo hídrico.

5.2 TRATAMENTO DO EFLUENTE DO CAFÉ POR ELETROCOAGLAÇÃO

Os tratamentos do efluente coletado foram realizados de duas formas. O ensaio 1 consistiu na eletrocoagulação sem a aplicação de NaCl, e o ensaio 2 utilizou-se o NaCl.

5.2.1 Remoção da Turbidez

O primeiro parâmetro analisado foi a turbidez e os valores obtidos podem ser vistos na Tabela 7.

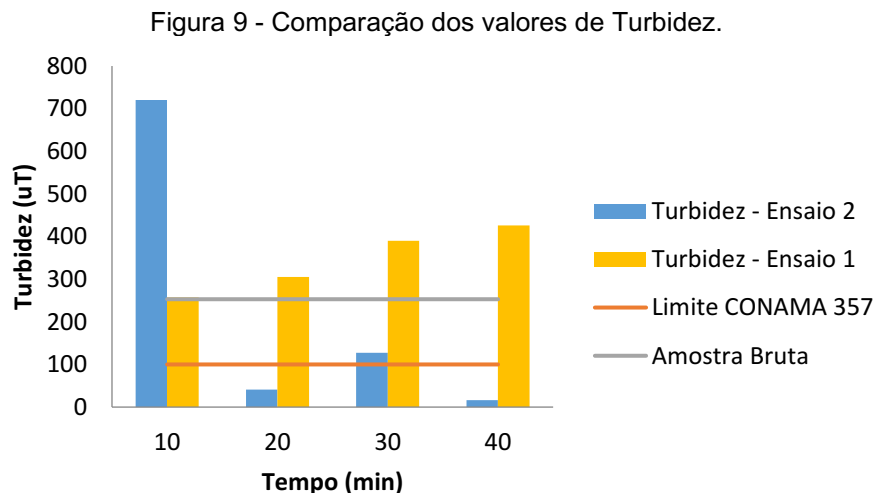
Tabela 7 - Valores de turbidez.

Tempo	Turbidez (uT)	
	Ensaio 1*	Ensaio 2**
0	253	253
10	257	720
20	305	40,7
30	390	127
40	426	16,1

Notas: (1)* sem NaCl. (2)** com NaCl.

Fonte: Autoria Própria (2020).

Uma comparação entre os valores de turbidez do ensaio 1 e do ensaio 2 com a legislação CONAMA 357/2005 pode ser vista na Figura 9.



Fonte: Autoria Própria (2020).

No primeiro ensaio, após o tratamento, observou-se o crescimento da turbidez, partindo de um valor bruto de 253 uT, de 257 uT aos 10 primeiros minutos, 305 uT aos 20 minutos, 390 uT aos 30 minutos e chegando em 426 uT após 40 minutos. Com relação ao segundo ensaio, embora ocorreu um aumento nos primeiros dez minutos de 720 uT, houve uma grande diminuição ao fim do processo, finalizando em um valor de 16,1 uT, que resultou em uma redução de 93,63% da turbidez.

Deste modo, embora a eletrocoagulação não tenha beneficiado o ensaio 1, verifica-se que, com a utilização de NaCl no segundo ensaio, houve uma grande redução desse parâmetro na qual esse valor ficou dentro do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005 de 100 uT, o que torna este processo promissor.

De acordo com FOCO e TERÁN (2007), a utilização e variação da concentração de NaCl influencia na redução da turbidez. Nos tratamentos de águas residuárias, com a aplicação da eletrocoagulação eles obtiveram uma remoção de 37,2 % de turbidez sem o uso de NaCl e remoção de 96,0% usando NaCl.

Outro experimento conduzido por MÓDENES et al. (2017) mostrou esse comportamento. Ao aplicar a técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouros de aves, obtiveram uma média de 92,08% na redução de turbidez.

Por fim, em pesquisa sobre o processo de eletrocoagulação para o tratamento de águas residuárias da indústria de pescados, mostrou uma redução de 96,9% (JOÃO et al, 2018).

Deste modo, fica evidente que a aplicação da eletrocoagulação com a utilização de NaCl é eficiente na remoção da turbidez, tornando sua aplicação válida.

5.2.2 Remoção dos Sólidos Totais Dissolvidos

O próximo parâmetro analisado foram os Sólidos Totais Dissolvidos e o valor obtido pelos experimentos pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de Sólidos Totais Dissolvidos.

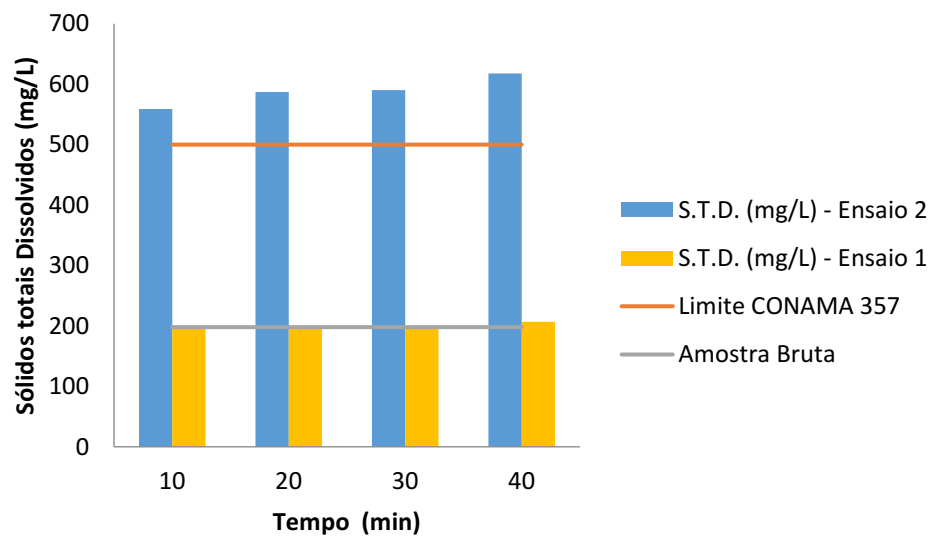
Tempo	Sólidos Totais Dissolvidos (mg.L ⁻¹)	
	Ensaio 1*	Ensaio 2**
0	198	198
10	200	559
20	199	587
30	199	590
40	207	618

Notas: (1)* sem NaCl. (2)** com NaCl.

Fonte: Autoria Própria (2020).

A Figura 10 mostra os valores obtidos de Sólidos Totais Dissolvidos entre os dois ensaios realizados e compara com o limite estipulado pela Resolução CONAMA 357/2005.

Figura 10 - Comparação dos valores de STD.



Fonte: Autoria Própria (2020).

No primeiro ensaio, nota-se que os STD permanecem praticamente constantes, variando pouco ao longo dos 40 minutos de eletrocoagulação. Em relação ao ensaio 2, ocorreu um crescimento considerável dos resultados com valor inicial de 198 mg.L⁻¹ e valor final de 618 mg.L⁻¹ ao fim de quarenta minutos.

Este comportamento pode ser explicado por alguns fatores que estão relacionados ao processo da eletrocoagulação.

Segundo MENESES et al, (2012), que realizou o tratamento de efluente do biodiesel utilizando a eletrocoagulação, notou que, devido à eletrocoagulação liberar pequenas quantidades de metais dos eletrodos e estes ficarem liberados no efluente, com isso, ao longo do tempo, os valores de STD. tendem a aumentar.

Além disso, outro fator que pode ter contribuído é presença de sais dissolvidos, pois sua característica torna a remoção difícil, além de aumentar a condutividade elétrica (CRESPILHO et al., 2003).

Portanto, este aumento dos STD nos ensaios da eletrocoagulação ocorreu devido à concentração do NaCl e à perda dos metais que foram parar no efluente.

5.2.3 Variação da Condutividade Elétrica

Em relação à condutividade elétrica, após os tratamentos obteve-se os valores deste parâmetro que estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores de Condutividade Elétrica.

Tempo	Condutividade Elétrica (mS.cm ⁻¹)	
	Ensaio 1*	Ensaio 2**
0	0,81	0,81
10	0,87	9,47
20	0,86	10,62
30	0,86	11,19
40	0,87	11,89

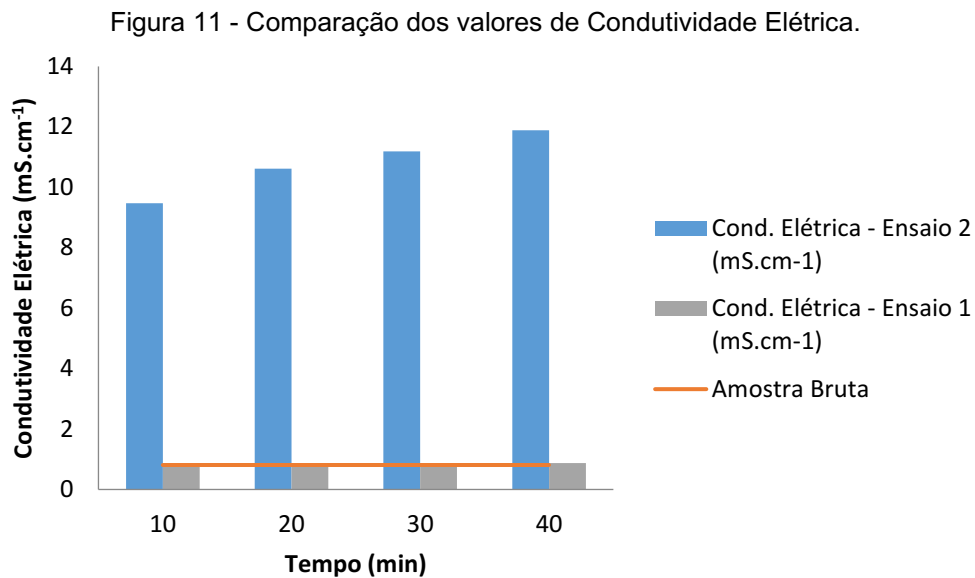
Notas: (1)* sem NaCl. (2)** com NaCl.

Fonte: Autoria Própria (2020).

No primeiro ensaio, após a eletrocoagulação, observou-se um pequeno aumento na condutividade elétrica, não muito relevante, basicamente os valores permaneceram na média ao longo dos quarenta minutos, em torno de 0,85 mS.cm⁻¹.

Já no ensaio 2, contendo a presença do NaCl, houve um aumento considerável na condutividade elétrica, o que já era de se esperar pois um bom condutor elétrico estava sendo utilizado no tratamento deste efluente. Saindo de um valor bruto inicial de $0,81 \text{ mS.cm}^{-1}$ e finalizando em $11,89 \text{ mS.cm}^{-1}$ após os 40 minutos de tratamento.

Uma comparação entre os dois ensaios realizados e os valores brutos e pós tratamento, podem ser vistos na Figura 11.



Fonte: Autoria Própria (2020).

Assim como nos trabalhos citados por Foco e Terán (2007), houve também um aumento da condutividade elétrica ao longo da eletrocoagulação quando aplicado o NaCl. Segundo Rufato (2018), na presença de altas concentrações de sal, há a liberação de grandes quantidades de íons Cl^- , que podem formar compostos organoclorados, que possuem alta toxicidade.

Segundo Nascimento (2018), a eficiência do processo de eletrocoagulação, quase sempre, depende de três fatores: condutividade elétrica, tempo de eletrólise e pH. Além disso, a adição de NaCl para o aumento da condutividade proporciona um aumento na formação de cloretos, que pode ser prejudicial à saúde devido a quantidade de sal na água.

5.2.3 Variação do pH

O último parâmetro analisado foi o pH e seus valores obtidos podem ser vistos na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores de pH.

Tempo	pH	
	Ensaio 1*	Ensaio 2**
0	5,79	5,79
10	5,86	6,89
20	6,43	7,27
30	6,97	7,87
40	7,10	8,10

Notas: (1)* sem NaCl. (2)** com NaCl.

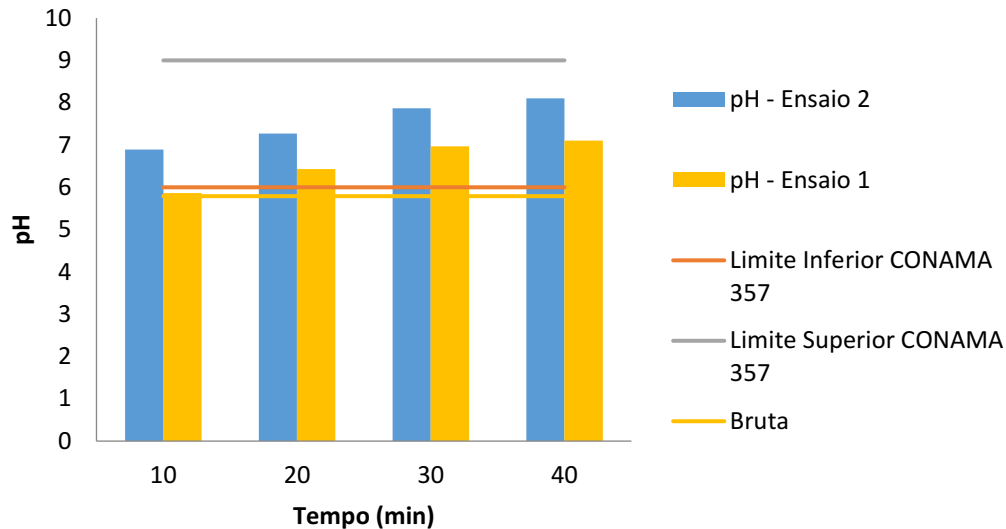
Fonte: Autoria Própria (2020).

Pode-se observar que, no primeiro ensaio, os valores de pH estavam abaixo do valor recomendado pelo CONAMA 357/2005 que era entre 6 a 9 e após o tratamento da eletrocoagulação, os valores de pH ficaram dentro do permitido, em quarenta minutos de tratamento.

No segundo ensaio, usando o NaCl, o pH também se tornou mais alcalino e superou o ensaio anterior, finalizando com um valor de 8,10 ao final dos 40 minutos, também dentro do estipulado pela Resolução CONAMA 357/2005.

A comparação entre os ensaios e os limites estipulados pela Resolução CONAMA 357/2005 pode ser vista na Figura 12.

Figura 12 - Comparação dos valores de pH.



Fonte: Autoria Própria (2020).

De acordo com Benazzi (2013), em seus trabalhos sobre otimização de um sistema de eletrofloculação, ao realizar 3 tratamentos, utilizando Policloreto de Alumínio, Sulfato de Alumínio e Eletrocoagulação, o último foi o único que conduziu uma alteração do pH final em relação ao inicial que partira de um valor de 6,0 para um final de 7,8.

Segundo as análises realizadas por Ritter (2016) em seu trabalho sobre a influência do pH no processo de eletrocoagulação aplicado a efluentes têxteis tratados biologicamente, em seus doze experimentos, o pH indicou uma tendência de aumento ao longo do tempo e caso necessitasse de estabilidade, seria necessário a aplicação de reagentes.

Deste modo, os valores obtidos pelas análises realizadas estão de acordo com as literaturas e seu comportamento conforme esperado.

Para fins de eficiência, a eletrocoagulação é um bom processo quando se quer priorizar o valor do pH, pois não é preciso ajuste posterior em pós tratamento.

5.3 ANÁLISE DO CUSTO DO PROCESSO

5.3.1 Desgaste dos Eletrodos

O consumo dos eletrodos nos ensaios pode ser verificado na Tabela 16.

Tabela 11 - Consumo dos Eletrodos.

Tempo (min)	Consumo (Kg/m ³)	
	Ensaio 1*	Ensaio 2**
10	0,0168	0,1747
20	0,0308	0,3724
30	0,0377	0,5016
40	0,0481	0,6531

Notas: (1)* sem NaCl. (2)** com NaCl.

Fonte: Autoria Própria (2020).

Para o cálculo, foi utilizado os tempos de corrente elétrica de 10 a 40 minutos, massa molar do alumínio de $26,98 \text{ g.mol}^{-1}$, 3 eletrodos de alumínio, constante de Faraday = $9,65 \times 10^4 \text{ C.mol}^{-1}$.

Pode-se observar que o consumo do eletrodo foi maior no ensaio 2, com utilização do NaCl, logo, este ensaio consome mais o alumínio.

As correntes elétricas variaram de acordo entre os ensaios, entre 0,43 A (Amperes) e 6,66 A e podem ser vistas na Tabela 12.

Tabela 12 - Corrente Elétrica.

Tempo (min)	Corrente Elétrica (A)	
	Ensaio 1*	Ensaio 2**
10	0,60	6,25
20	0,55	6,66
30	0,45	5,98
40	0,43	5,84

Notas: (1)* sem NaCl. (2)** com NaCl.

Fonte: Autoria Própria (2020).

5.3.2 Consumo de Energia Elétrica

O consumo de energia elétrica para os ensaios de eletrocoagulação está representado na Tabela 13.

Tabela 13 - Consumo de Energia Elétrica.

Tempo (min)	Consumo de Energia Elétrica (KWh/m ³)	
	Ensaio 1*	Ensaio 2**
10	0,550	5,729
20	1,008	12,210
30	1,238	16,445
40	1,577	21,413

Notas: (1)* sem NaCl. (2)** com NaCl.

Fonte: Autoria Própria (2020).

Para o cálculo do consumo de energia elétrica, considerou-se uma fonte de 11V, um volume tratado de 0,002 m³ e tempo de eletrocoagulação variando até 40 minutos.

No ensaio 1, o consumo de energia elétrica, ao final da eletrocoagulação, foi de 1,577 KWh/m³, já no ensaio 2 foi de 21,413 KWh/ m³. Pode-se confirmar que a utilização do NaCl aumenta o consumo de energia elétrica, isso se dá pois quanto maior a corrente elétrica, maior o consumo da mesma.

5.3.3 Custo do Processo de Eletrocoagulação.

O cálculo do custo de operação do processo de eletrocoagulação para cada m³ de efluente tratado pode ser visto na Tabela 14.

Tabela 14 - Custo de Operação.

Tempo (min)	Custo de Operação (R\$/m ³)	
	Ensaio 1*	Ensaio 2**
10	0,431	5,554
20	0,790	10,630
30	0,969	13,946
40	1,235	17,837

Notas: (1)* sem NaCl. (2)** com NaCl.

Fonte: Autoria Própria (2020).

Para o cálculo do custo de operação, utilizou-se a tarifa de energia elétrica de 0,70293 R\$/KWh estabelecida pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para a Companhia Paranaense de Energia (COPEL) (Brasil, 2020).

Contou-se também o custo do Alumínio para a confecção dos eletrodos, no valor de R\$ 5,20 e o NaCl quando utilizado, cujo custo foi de R\$ 1,09 por kg.

De acordo com os valores obtidos, notou-se que houve um custo muito maior na eletrocoagulação que utilizava NaCl, que chegou a R\$ 17,837.

6 CONCLUSÃO

O processo de eletrocoagulação aplicado ao efluente da indústria cafeeira, apresentou resultados satisfatórios em relação aos parâmetros analisados: Turbidez, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos e pH.

Os melhores resultados obtidos foram para a turbidez e o pH especificamente no segundo ensaio, com a utilização de NaCl. Deste modo, com a finalidade de reduzir a turbidez e ajustar o pH para um patamar mais alcalino e mantê-los dentro dos padrões de lançamento estipulados pela Resoluções CONAMA Nº 357/2005 e Nº 430/2011, a eletrocoagulação com eletrodos de alumínio e com a presença de NaCl pode ser utilizada indicada. Já em relação aos demais parâmetros, como a condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos os resultados obtidos não se enquadraram dentro da proposta de melhoria, desta forma é válido a busca por outras formas de tratamento deste efluente líquido.

Em relação ao custo de operação do processo da eletrocoagulação, observou-se que há uma considerável diferença entre usar ou não o NaCl. Este último apresentou despesas bem maiores que o primeiro. Com isso, os maiores custos estão relacionados com a maior quantidade usada de sal, pois acelera o consumo dos eletrodos pela corrosão e aumenta o consumo de energia elétrica, deste modo, é necessário avaliar se o custo para o tratamento valerá a pena.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, J. E. C.; PARENTE, T. C.; RIBEIRO, J. P.; MAIA, L. G. C.; NETO, E. F. A.; NASCIMENTO, R. F. **Avaliação da eficiência da eletrocoagulação-flotação na descoloração do efluente têxtil**. Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Universidade Federal do Ceará. Departamento de Química Analítica. 2014.

ALMEIDA, C. D. G. C.; SILVA, I. J. O. **Uso de águas residuárias do beneficiamento do café**. THESIS São Paulo, ano III, v. 6. p. 30-43. 2 semestre. 2006

ANDRADE, L. H. **Tratamento de efluente de indústria de laticínios por duas configurações de biorreator com membranas e nanofiltração visando reúso**. Dissertação de Mestrado .Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte. 2011.

APHA (American Public Health Association). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22 Ed. Washington –DC; 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648: Estudo de Concepção de Sistemas de Esgoto Sanitário**. Rio de Janeiro. 1986.

BALLANEC, B.; GÉSAN-GUIZIOU, G.; CHAUFER, B.; RABILLER-BAUDRY, M.; DAUFIN, G. Treatment of dairy process waters by membrane operation for water reuse and milk constituents concentration. **Desalination, Amsterdam**, v. 147, n. 1-3, p. 89-94, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00581-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00581-7)

BASSETTO, P.; SANTO, R. S. do E. Processo produtivo do café torrado e moído. IN: Encontro de Engenharia de Produção Agroindustrial. p. 8. 2016.

BENASSI, T. L. **Otimização de um sistema de eletrofloculação em fluxo contínuo para o tratamento de efluentes líquidos das indústrias de laticínios**. Universidade

Regional Integrada do Alta do Uruguai e das Missões – URI. Dissertação de Pós-Graduação em Alimentos. Erechim. Rio Grande do Sul. 2013.

BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Ranking de tarifas. 2020. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>>. Acesso em 31 out. 2020.

BRASIL. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA. Brasília. Ministério da Saúde.

BRASIL. 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, do Conselho Nacional do Meio Ambiente. CONAMA. Brasília. Ministério da Saúde.

BRIÃO, V. B.; TAVARES, C. R. G. Ultrafiltração de efluente da indústria de laticínios para recuperação de nutrientes: efeito da pressão e da velocidade tangencial. Nota Científica. **Brazilian Journal of Food Technology**. Campinas, v. 15, n. 4, p. 352-362, out/dez. 2012.

BRITZ, T. J.; LAMPRECHT, C.; SIGGE, G. O. Dealing with environmental issues. In: BRITZ, T. J.; ROBINSON, R. K. **Advanced dairy science and technology**. Oxford: **Blackwell Publishing Ltd**, 2008, cap. 2, p. 35-75.

CAJAZEIRA, M. O. **Impactos e conflitos socioambientais na comunidade do entorno da fábrica de cimento do município de Nossa Senhora do Socorro/SE**. 2011. 132 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) –Núcleo de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2011.

CANZIANI, A. **Repositório UTFPR – Campus Londrina**. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2071/4/10anoslondrina.pdf>>. Acesso em out. 2019

CAMMAROTA, M. C.; FREIRE, D. M. G. A review on hydrolytic enzymes in the treatment of wastewater with high oil and grease content. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 17, p. 2195-2210, 2006.

CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Journal of Hazardous Materials**. Hong Kong, China, p. 11-41. 15 jul. 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586603002636>>. Acesso em: 31 out. 2020.

CRESPILHO, F. N.; SANTANA, C. G.; REZENDE, M. O. O. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo. Quim. Nova, Vol. 27, No. 3, p. 387-392. 2004.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Acompanhamento da Safra Brasileira – Café. (Safra de Jan/ 2020). Disponível em: <.>. Acesso em: 12 set. 2020.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA - EMBRAPA: **MANUAL DO CAFÉ: Colheita e preparo**. Belo Horizonte. Emater – MG. Abril de 2016. P. 28

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA - EMBRAPA: **Taxa de crescimento do consumo mundial de café de 2% ao ano projeta 208 milhões de sacas até 2030** - 2017. Disponível em: < <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/44984677/taxa-de-crescimento-do-consumo-mundial-de-cafe-de-2-ao-ano-projeta-208-milhoes-de-sacas-ate-2030>>. Acesso em: 12 set. 2020.

FERRAREZ, A. **Tratamento de efluentes líquidos do processamento de café por meio de digestão anaeróbica**. Ciclo de Palestras Amb-Hidro. Instituto Federal Fluminense – Campus Itaperuna, 2020.

FLECK, Leandro; TAVARES, Maria Hermínia Ferreira; EYNG, Eduardo. **Utilização da técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluentes têxteis**: uma revisão. Revista 59 Eixo, Brasília, v. 2, n. 2, p.28-36, dez. 2013.

FOCO, M. L. R.; TERÁN, F. J. C. **Avaliação do efeito da condutividade na eletrocoagulação-flotação aplicada ao tratamento físico-químico de águas residuárias**. Semana: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 28, n. 2, p.99-106, dez. 2007.

FRASSON, A. C. **Escolha de alternativa tecnológica para tratamento e destino final de lodo gerado no tratamento de efluentes líquidos de agroindústrias com base no método AHP**. 2011. Dissertação. (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento). Universidade Estadual de Londrina, Paraná, 2011.

FORNARI, M. M. T. **Aplicação da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de curtume**. 2007. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2007.

GEA (Engineering for a better world). Tratamento de efluentes na produção de café instantâneo: econômico e eficiente com decantadores GEA. Disponível em: <<https://www.gea.com/pt/environment/industrial-effluents/coffee.jsp>>. Acesso em: 12 set. 2020.

GONÇALVES, B. Z. **Tratamento de despejos de laticínios: obtenção de parâmetros de projeto, em escala de laboratório através do uso de reatores biológicos aeróbios**. apud CENTURIÓN, R. E. B., GUNTHER, M. A. São Paulo: CETESB, 1976. 35p.

GONCALVES, B. Z. **Tratamento de efluente de laticínio em reator de leito estruturado aeróbico**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina. 2017.

HADDIS, A.; DEVI, R. **Effect on effluent generated from coffee processing plant on the water bodies and human health in its vicinity**. Journal of Hazardous Materials, Amsterdam, v. 152, n. 1, p. 259-262, 2008.

HENARES, J. F. **Caracterização do efluente de laticínio: análise e proposta de tratamento**. Trabalho de Conclusão de Curso. Campo Mourão. 2015

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Comissão Nacional de Classificação**. Disponível em: <
<https://cnae.ibge.gov.br/en/component/content/article/94-7a12/7a12-vamos-conhecer-o-brasil/nosso-territorio/1461-o-brasil-no-mundo.html>> Acesso em nov. 2019.

JOÃO, J. J.; EMERICK, T.; FILHO, U. de S.; NISHIHORA, R. K. Processo de eletrocoagulação-flotação: Investigação dos parâmetros operacionais para o tratamento de águas residuais da indústria de pescados. **Quim. Nova**, Vol. 41, No 2, 163-168, 2018.

KONDO, M. M.; MORAES, R. G. M.; ANDRADE, S. J. de; SILVA, M. R. A. da. Processos fenton e foto-fenton no tratamento de águas residuárias dos frutos do cafeeiro. *Coffee Science*, Lavras, v. 9, n. 4, p. 506 – 515. 2014.

MACHADO, R. M. G.; FREIRE, V. H.; SILVA, P. C.; FIGUE-RÊDO, D. V.; FERREIRA, P. E. **Controle ambiental nas pequenas e médias indústrias de laticínios**. 1 ed. Belo Horizonte: Segrac, 2002, 223 p.

MAGANHA, M.F.B. **Guia técnico ambiental da indústria de produtos lácteos**. São Paulo: CETESB, 2006. 95 p.

MARTINS, A. L. N. **Estudo da variação de concentração de cloreto de sódio no processo de eletrocoagulação aplicado ao tratamento de água.** Trabalho de Conclusão de Curso. Londrina. 2017.

MENESES, J. M.; VASCONCELOS, R. de F.; FERDANDES, T. de F. F.; ARAÚJO, G. T. Tratamento do efluente do biodiesel utilizando eletrocoagulação/ flotação: Investigação dos parâmetros operacionais. Unidade Acadêmica de Engenharia Química. Universidade Federal de Campina Grande. **Quim. Nova**, Vol. 35, No 2, 235-240. São Paulo. 2012.

MÓDENES, A. N.; QUINÕES, F. R. E.; YASSUE, P. H.; PORTO, T. M.; THEODORO, P. S. **Aplicação da técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouro de aves.** Artigo Técnico. Eng. Sanitária Ambiental. p. 571-578, 2017.

MOLLAH, Mohammad Y.A. et al. **Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation.** Journal Of Hazardous Materials. [s. L.], p. 199-210. 18 out. 2004.

MORALES, F. J.; FERNÁNDEZ, F. C.; JIMÉNEZ, P. S.; **Iron binding ability of melanoidins from food and model systems.** Food Chemistry. V. 90, n. 4, p. 821-827, 2005)

NETO, S. A.; MAGRI, T. C.; SILVA, G. M.; ANDRADE, A. R. **Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação:** um experimento para cursos de graduação em química. Nova.São Paulo, p. 1468-1471. 2011.

PIMENTA, A. F. Tratamento de Efluente de Indústria de Café via Adsorção em Biocarvão Ativado. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2018.

RITTER, M. T. **Influência do pH no processo de eletrocoagulação aplicado a efluentes têxteis tratados biologicamente.** Trabalho de Conclusão de Curso.

Universidade Federal de Santa Catarina. Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. 2016.

RUFATO, E. D. **Estudo do processo de eletrocoagulação para o tratamento de efluentes de abatedouros de aves**. Dissertação de Pós-Graduação. Universidade Federal do Paraná. 2018.

SARAIVA, C. B.; MENDONÇA, R. C. S.; SANTOS, A. L.; PEREIRA, D. A. **Consumo de água e geração de efluentes em uma indústria de laticínios**. Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes, v. 64, n. 367, p. 10-18, 2009.

SHANMUKHAPPA, D. R.; ANANDA, R. P. A.; SRINIVASAN, C. S. **Water pollution by coffee processing units and its abatement**. Indian Coffee, v. 10, p.3-9, 1998

SILVA, A. C. **Formulações de blends de café arábica para bebida de café expresso: percepção e expectativa sensorial**. Dissertação, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2009.

SILVA, D. J.P., **Resíduos na Indústria de Laticínios**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa: Departamento de Tecnologia de Alimentos, 20 p. Viçosa, Minas Gerais, 2011.

THEODORO, J. D. P. **Tratamento de água através do processo de eletrocoagulação associado ao uso de coagulante orgânico (Tanfloc Sg)**. 2007.

THEODORO, P. S. **Utilização da eletrocoagulação no tratamento de efluentes da indústria galvânica**. 2010. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2010.

VILLA, R. D.; SILVA, M. R. A.; NOGUEIRA, R. F. P. **Potencial de aplicação do processo foto-fento/solar como pré tratamento de efluente da indústria de laticínios.** *Quim. Nova*, v. 30, No 8, 1799-1803, p. 1. 2007

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos.** Belo Horizonte: UFMG, v. 1, 1996.

ZAYAS, T. P.; GEISLER, G.; HERNANDEZ, F. Chemical Oxygen demand reduction in coffee wastewater through chemical flocculation and advanced oxidation process. *Journal of Environmental Sciences*, v. 19, n.3, p. 300-305, 2007.