

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LEONARDO MITSUO YOSHINO**

**TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA SINTÉTICA  
CONTENDO FUROSEMIDA VIA ELETROCOAGULAÇÃO**

**LONDRINA**

**2022**

**LEONARDO MITSUO YOSHINO**

**TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA SINTÉTICA CONTENDO FUROSEMIDA VIA  
ELETROCOAGULAÇÃO**

**Treatment of synthetic wastewater containing furosemide via electrocoagulation**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientadora: Profa. Dra. Joseane Debora Peruço Theodoro  
Coorientador: Doutor Paulo Sergio Theodoro

**LONDRINA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**LEONARDO MITSUO YOSHINO**

**TRATAMENTO DE ÁGUA RESIDUÁRIA SINTÉTICA CONTENDO FUROSEMIDA VIA  
ELETROCOAGULAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Nome do Curso de Engenharia Ambiental e  
Sanitária da Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 23/junho/2022

---

Profa. Edilaine Regina Pereira  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Ajadir Fazolo  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Profa. Joseane Debora Peruço Theodoro  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**LONDRINA**

**2022**

Dedico este trabalho à minha família, que sempre será  
meu alicerce.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe, pela paciência e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida. Certamente foi minha maior inspiração.

Ao meu avô, pelo companheirismo e pela vontade de sempre querer me ensinar um pouco mais sobre o mundo.

Ao meu pai, que sempre me incentivou a continuar lutando pelos meus objetivos.

Agradeço à Prof. Dra. Joseane Debora Peruço Theodoro por todo suporte e conhecimento compartilhado ao longo do trabalho, assim como ao Dr. Paulo Sergio Theodoro que ofereceu suporte durante os experimentos.

À Prof. Dra. Edilaine Regina Pereira e ao Prof. Ajadir Fazolo por aceitarem fazer parte da banca, e apresentarem sugestões de melhoria que foram essenciais no desenvolvimento do estudo.

Agradeço à Univesidade Tecnológica Federal do Paraná pela oportunidade de graduação como Engenheiro Ambiental e Sanitário, assim como toda estrutura fornecida ao longo dos anos de formação para meu desenvolvimento acadêmico.

Aos amigos, que com certeza tornaram a caminhada até então mais leve, além de sempre me motivarem.

## RESUMO

É inevitável que o ser humano deixe seus rastros, e nesse trabalho foi avaliado a contaminação de emergentes antropogênica do meio fàrmaco, sendo o poluente a furosemida. O contaminante emergente furosemida chega na natureza principalmente pelo descarte de efluentes das indústrias farmacêuticas e pelo esgoto. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi analisar a remoção da contaminante emergente furosemida de uma água sintética, por meio do método de eletrocoagulação, utilizando quatro eletrodos de alumínio. Nele, ocorre a oxidação dos eletrodos como consequência da aplicação de uma corrente externa no sistema, contribuindo para que haja a coagulação do contaminante. Como objetivo do estudo, está a avaliar a eficiência do método de eletrocoagulação na remoção da furosemida das amostras de água contaminada, e ainda, avaliar os resultados obtidos em relação ao custo de operação. Foram realizados experimentos com 36 ensaios, sendo 18 submetidos à tensão de 5 Volts e 18 ensaios à 11 Volts. Ambos os agrupamentos estão dispostos com ensaios de três diferentes concentrações de furosemida: 0,1 mg/mL, 0,2 mg/mL e 0,3 mg/mL. Também foram submetidos à três diferentes tempos de eletrocoagulação: 10, 20 e 30 minutos. Pode-se observar que não houve diferença significativa de remoção do contaminante entre as duas tensões empregadas, porém, a concentração inicial da amostra contaminada e o tempo de eletrocoagulação foram as variáveis que demonstraram maior importância no processo. A maior porcentagem de remoção da furosemida nos ensaios submetidos à 5 Volts foi de 58,77% (valor alcançado por quatro ensaios) nos tempos totais de 10, 20 e 30 minutos em uma concentração inicial de 0,3 mg/mL de furosemida. Já nos ensaios de 11 Volts a melhor eficiência de remoção foi de 60,26%, sendo 30 minutos tempo de eletrocoagulação utilizado em um ensaio com concentração inicial de 0,3 mg/L. Como o esperado, o maior desgaste do eletrodo foi alcançado pelos ensaios submetidos à 11 Volts, e em relação ao custo de operação, o ensaio de o maior custo foi de 2,09 R\$/m<sup>3</sup>. Já para os ensaios submetidos à 5 Volts, o maior custo foi de 0,73 R\$/m<sup>3</sup>. Os resultados do estudo indicaram uma remoção significativa de furosemida, mas para beirar a totalidade de remoção, é recomendado a adição de outros métodos de tratamento da água residuária.

Palavras-chave: Furosemida; eletrocoagulação; poluentes emergentes; tratamento de efluente.

## ABSTRACT

Nature plays a fundamental role in the balance of the Earth. It is inevitable that human beings leave their traces, and in this work the contamination of anthropogenic emerging from the drug environment was evaluated, the pollutant being furosemide. The emerging contaminant furosemide arrives in nature mainly through the disposal of effluents from pharmaceutical industries and through sewage. Thus, the objective of this work was to analyze the removal of the emerging contaminant furosemide from a synthetic water, through the electrocoagulation method, using four aluminum electrodes. In it, oxidation of the electrodes occurs as a result of the application of an external current in the system, contributing to the coagulation of the contaminant. The objective of the study is to evaluate the efficiency of the electrocoagulation method in the removal of furosemide from contaminated water samples, and also to evaluate the results obtained in relation to the cost of operation. Experiments were carried out with 36 tests, 18 of which were subjected to a voltage of 5 Volts and 18 tests to 11 Volts. Both groups are arranged with assays of three different concentrations of furosemide: 0.1 mg/mL, 0.2 mg/mL and 0.3 mg/mL. They were also submitted to three different times of electrocoagulation: 10, 20 and 30 minutes. It can be observed that there was no significant difference in contaminant removal between the two voltages used, however, the initial concentration of the contaminated sample and the electrocoagulation time were the variables that showed greater importance in the process. The highest percentage of furosemide removal in the tests submitted to 5 Volts was 58.77% (value achieved by four tests) at 10, 20 and 30 minutes in an initial concentration of 0.3 mg/mL of furosemide. In the 11 Volt assays, the best removal efficiency was 60.26%, with 30 minutes of electrocoagulation time used in an assay with an initial concentration of 0.3 mg/mL. As expected, the highest electrode wear was achieved by the tests submitted to 11 Volts, and in relation to the operating cost, the highest cost test was 2.09 R\$/m<sup>3</sup>. As for the tests submitted to 5 Volts, the highest cost was 0.73 R\$/m<sup>3</sup>. The results of the study indicated a significant removal of furosemide, but to border the total removal, the addition of other wastewater treatment methods is recommended.

Keywords: Furosemide; electrocoagulation; emerging pollutants; effluent treatment.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Possíveis rotas dos contaminantes emergentes até a natureza.....	16
Figura 2 – Fórmula estrutural da furosemida. ....	17
Figura 3 - Interações envolvidas no reator eletrolítico no processo de EC.....	20
Figura 4 - Esquema de um reator de EC de bancada com eletrodos monopolares com conexões em paralelo.....	21
Figura 5 - Esquema de um reator de EC de bancada com eletrodos monopolares com conexões em série.....	22
Figura 6 - Esquema de um reator de EC de bancada com eletrodos monopolares com conexões em série.....	23
Figura 7 - Esquema de um reator de EC de bancada com eletrodos bipolares com conexões em paralelo.....	24
Figura 8 - Fármaco furosemida utilizado no estudo. ....	26
Figura 9 - Espectrofotômetro utilizado no estudo.....	27
Figura 10 - Solução NaOH 0,1 mol/L.....	28
Figura 11 - Hidróxido de sódio utilizado no estudo. ....	29
Figura 12 - Solução padrão 0,3 mg/L.....	30
Figura 13 - Papel filtro utilizado na filtração. ....	31
Figura 14 - Processo de filtração.....	32
Figura 15 - Soluções de furosemida diluídas para confecção da curva de calibração.....	33
Figura 16 - Curva de calibração. ....	35
Figura 17 - Eletrodo com placas de alumínio em paralelo.....	37
Figura 18 - Fonte de alimentação de corrente contínua. ....	37
Figura 19 - Reator de eletrocoagulação em nível de bancada. A) Sistema de eletrodos; B) Recipiente de vidro; C) Agitador magnético; D) Fonte de corrente elétrica.....	38
Figura 20 - Concentração de furosemida remanescente. ....	43
Figura 21 - Eficiência da remoção de furosemida. ....	45
Figura 22 – Gráfico de Pareto do processo de EC a 11 Volts.....	47
Figura 23 - Gráfico de Pareto do processo de EC a 5 Volts. ....	49
Figura 24 - Tabela ANOVA do processo de EC a 11 Volts.....	50
Figura 25 - Tabela ANOVA do processo de EC a 5 Volts.....	51
Figura 26 - Gráfico de superfície comportamental do processo de EC a 11 Volts. ....	52
Figura 27 - Gráfico de superfície comportamental do processo de EC a 5 Volts... ..	53
Figura 28 - Consumo do eletrodo dos ensaios submetidos à 11 Volts.....	54
Figura 29 - Consumo do eletrodo dos ensaios submetidos à 5 Volts.....	55
Figura 30 - Consumo de energia elétrica dos ensaios submetidos à 11 Volts. ....	56
Figura 31 - Consumo de energia elétrica dos ensaios submetidos à 5 Volts. ....	57
Figura 32 - Custo de operação dos ensaios submetidos à 11 Volts.....	58
Figura 33 - Custo de operação dos ensaios submetidos à 5 Volts.....	59



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Massas utilizadas para o preparo das soluções padrão. ....</b>	<b>30</b>
<b>Tabela 2 - Tabela de apoio à confecção da curva de calibração e análise da amostra. ....</b>	<b>34</b>
<b>Tabela 3 - Massas utilizadas para o preparo das amostras brutas contaminadas com furosemida.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabela 4 - Planejamento fatorial para o tratamento da água de estudo pelo processo de eletrocoagulação.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabela 5 - Planejamento experimental dos ensaios em destaque. ....</b>	<b>44</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
CE	Contaminante Emergente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EC	Eletrocoagulação
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
IUPAC	International Union of Pure and Applied Chemistry
MS	Ministério da Saúde
OD	Oxigênio Dissolvido
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial Hidrogênico
PIB	Produto Interno Bruto
PVC	Policloreto de vinila
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SCB	Sistema de Classificação Biofarmacêutica
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
ST	Sólidos Totais
USGS	United States Geological Survey

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère
a	Custo de energia elétrica
Al	Alumínio
b	Custo dos eletrodos
C	Consumo elétrico
Celet	Consumo do eletrodo
Cenerg	Consumo de energia elétrica
Ci	Concentração inicial
Cf	Concentração final
cm	Centímetros
Coper	Custo total de operação
ddp	Diferença de potencial
Eremoção	Eficiência de remoção
F	Constante de Faraday = $96485 \text{ A.s.mol}^{-1}$
g	Gramas
h	Hora
H <sub>2</sub> O	Água
i	Intensidade da corrente
k	Kilo
L	Litro
M	Massa molar do elemento
m	Metro
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mel	Desgaste do eletrodo
mg	Miligrama
mL	Mililitro
mm	Milímetro
MM	Massa molar
mol	Massa molecular
n	Número de elétrons
NaOH	Hidróxido de Sódio
nm	Nanômetro
OH <sup>-</sup>	Íon Hidróxido
p	Valor de significância
R\$	Reais
s	Segundo
t	Tempo de aplicação da corrente
U	Tensão aplicada
V	Volts
W	Watt
µm	Micrômetro

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Abastecimento de água no Brasil.....</b>	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>Poluentes Emergentes.....</b>	<b>15</b>
3.2.1	Fármaco Furosemida.....	16
<b>3.3</b>	<b>Processos de tratamento de água e esgoto no Paraná.....</b>	<b>18</b>
<b>3.4</b>	<b>Eletrocoagulação.....</b>	<b>19</b>
3.4.1	Definições e reações envolvidas <i>no processo</i> .....	19
3.4.2	Variações dos reatores de eletrocoagulação.....	20
3.4.3	Aplicações da eletrocoagulação associados a poluentes em geral e poluentes emergentes.....	24
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1</b>	<b>Localização dos experimentos de estudo.....</b>	<b>26</b>
<b>4.2</b>	<b>Preparação da água sintética.....</b>	<b>26</b>
<b>4.3</b>	<b>Preparo da solução de NaOH 0,1 mol/L.....</b>	<b>27</b>
<b>4.4</b>	<b>Preparo das soluções padrão.....</b>	<b>29</b>
<b>4.5</b>	<b>Preparo das amostras para a confecção da curva de calibração.....</b>	<b>31</b>
4.5.1	Preparo da solução estoque de furosemida.....	31
4.5.2	Preparo das soluções diluídas de furosemida.....	32
<b>4.6</b>	<b>Confecção da curva de calibração da solução de furosemida e análise da amostra.....</b>	<b>33</b>
<b>4.7</b>	<b>Preparo de amostras brutas para eletrocoagulação.....</b>	<b>35</b>
<b>4.8</b>	<b>Reator de eletrocoagulação.....</b>	<b>36</b>
<b>4.9</b>	<b>Planejamento experimental.....</b>	<b>38</b>

4.10	Cálculo de eficiência de remoção.....	40
4.11	Cálculo do desgaste dos eletrodos (mel).....	41
4.12	Consumo de energia elétrica.....	41
4.13	Custo de operação.....	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1	Remoção de furosevida.....	43
5.2	Análise estatística .....	46
5.3	Consumo do eletrodo.....	53
5.4	Consumo de energia elétrica.....	54
5.5	Custo de operação.....	56
6	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS.....	60
	APÊNDICES.....	66

## 1 INTRODUÇÃO

O crescimento econômico juntamente com a expansão demográfica são fatores que podem estar diretamente ligados com o crescimento do consumo de produtos em geral. Conseqüentemente, é esperado que haja uma maior presença de substâncias das mais variadas classes existentes no ambiente, assim como reforçam Montagner et al. (2017).

A água, essencial para a manutenção da vida no planeta, possui papel importantíssimo para as atividades humanas pois apresentam valor comercial, social e cultural, segundo o que Mierzwa e Hespanhol (2005) citam em seu livro. Ainda em conformidade com os autores citados (2005), a água está envolvida nos mais diversos processos industriais. A crescente expansão demográfica no Brasil impõe cada vez mais uma maior demanda de água, tanto para consumo, ou para outros afins.

De acordo com Reis Filho et al. (2007) apud Garric et al. (2003), o desenvolvimento industrial farmacêutico teve como consequência diversos problemas ambientais, uma vez que foram disponibilizadas milhões de substâncias para consumo humano e animal, que hora ou outra, será lançada ao meio ambiente a partir da liberação de efluentes aos corpos hídricos ou como substância não metabolizada pelos usuários, assim como reforçam Reis Filho et al. (2007) apud Chapman (2006), Petrovi et al. (2005) e Calamari et al. (2003).

Tais substâncias, se enquadram na vasta lista dos chamados contaminantes emergentes (CEs). Para a agência norte-americana USGS (*United States Geological Survey*), os CEs se tratam de substâncias químicas de origem antrópica ou natural que não podem ser controladas no ambiente, e podem causar danos significativos em meio ecológico, ou para a saúde humana. Em conformidade com Osawa (2019), geralmente a presença desse tipo de poluente encontra-se em maior concentração nos efluentes domésticos.

Entre a gama de contaminantes emergentes já existentes e identificados, é possível exemplificar as substâncias citadas por Richardson e Kimura (2016), que incluem principalmente os fármacos e hormônios, produtos de higiene e de beleza, pesticidas, herbicidas, agrotóxicos, nanomateriais, microplásticos, ou até mesmo

microorganismos e toxinas liberadas pelas algas.

No Brasil, a concentração de CE ainda não é legislada, e não serve de parâmetro para a qualidade da água, o que indica que futuramente é passível de inclusão em monitoramentos periódicos da água. Dessa forma, vale ressaltar que os processos convencionais para o tratamento de água e esgoto não possuem etapas específicas para a remoção de CE, assim como citado por Cardoso (2019).

Assim sendo, a busca por metodologias capazes de remover tais substâncias já indicadas como nocivas ao equilíbrio ecológico e ao ser humano é necessária. Segundo Mollah (2004), a eletrocoagulação é uma opção para a remoção de diversos contaminantes emergentes, podendo atingir eficiências elevadas dependendo da substância a ser removida.

Uma alternativa que tem sido muito estudada para o tratamento de efluentes é a eletrocoagulação, técnica baseada em processos eletroquímicos que consiste na utilização de um reator com eletrodos onde é aplicado uma diferença de potencial, gerando agentes coagulantes através da dissolução eletrolítica de um ânodo, geralmente composto de ferro ou alumínio. Essas espécies formadas desestabilizam os colóides presentes no efluente, anulando as forças de repulsão e propiciando formação de flocos e a quebra de emulsões (CHEN, 2004).

Desta forma, esse trabalho tem como objetivo propor a remoção do contaminante emergente furosemida com a utilização da técnica de eletrocoagulação utilizando eletrodo de alumínio.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

O trabalho tem como objetivo geral avaliar a eficiência do processo de eletrocoagulação aplicada ao tratamento de água residuária sintética contaminada com o poluente emergente furosemida.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar a aplicação do processo de eletrocoagulação utilizando o planejamento experimental e observar a remoção de furosemida na água sintética após a utilização do eletrodo de alumínio.
- Analisar os parâmetros de processo da eletrocoagulação em relação ao custo de operação, levando em conta o desgaste do eletrodo e o custo de energia elétrica.



### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Abastecimento de água no Brasil

Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), cerca de 12% de toda água doce do planeta está presente no Brasil. Ainda assim, algumas regiões apresentam problemas hídricos. A região Norte, por exemplo, é a que possui maior reserva de água doce no país, mas somente 57,5% da sua população conta com o abastecimento de água tratada. Já a região Sudeste, é a que possui maior porcentagem de pessoas recebendo a água com o tratamento básico, com uma estimativa de 91,1%, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS).

Sabemos atualmente que cerca de 83,7% da população brasileira possui acesso à água tratada. Isso indica que uma grande parcela da população total ainda não é abastecida com uma água de mesma qualidade, uma triste realidade que aproximadamente 35 milhões de brasileiros enfrentam todos os dias, conforme os dados do SNIS (2019).

Ainda sobre as informações do SNIS (2019), estima-se que no Brasil, o consumo médio é de 153,9 litros de água por habitante/dia, uma quantidade média alta se comparada ao consumo médio ideal de 110 litros de água por habitante/dia estipulada pela Organização das Nações Unidas (ONU).

É importante também ressaltar que o recurso hídrico brasileiro sofre uma quantidade considerável de perdas. Conforme um cálculo realizado pelo Instituto Trata Brasil, uma quantidade referente a 7,1 mil piscinas olímpicas é perdida por dia. Analisando por região, a Norte é a que possui mais baixas, com uma porcentagem de 55,2 % de perda de água potável, enquanto a região Centro Oeste possui apenas 34,4%, a menor porcentagem de perdas (SNIS, 2019). É possível observar que tanto a maior, quanto a menor porcentagem, são elevadas. Ou seja, ainda há uma necessidade de melhoria na eficiência no abastecimento de água brasileiro.

### 3.2 Poluentes Emergentes

Juntamente ao desenvolvimento tecnológico, o poder das indústrias aumentou de forma muito significativa no mundo inteiro. Para Montagner et al. (2017), isso não foi diferente no Brasil, e como consequência, atualmente pode-se fazer o uso de uma gama dos mais variados produtos possíveis. Isso implica em facilidades no cotidiano das pessoas, todavia, alguns produtos possuem um alto potencial poluidor sem que até mesmo as pessoas que os utilizam saibam.

Em conformidade com Raimundo (2011), atualmente pouco se sabe sobre esse tipo de contaminante em corpos hídricos. Dessa forma, não se sabe ao certo as consequências que os poluentes emergentes podem causar e ainda não existe uma regulamentação específica na legislação. Portanto, as pesquisas atreladas nessa área são de extrema importância para que mais conhecimento seja disseminado, e talvez futuramente ocorram ajustes na legislação, incluindo o monitoramento dos CEs.

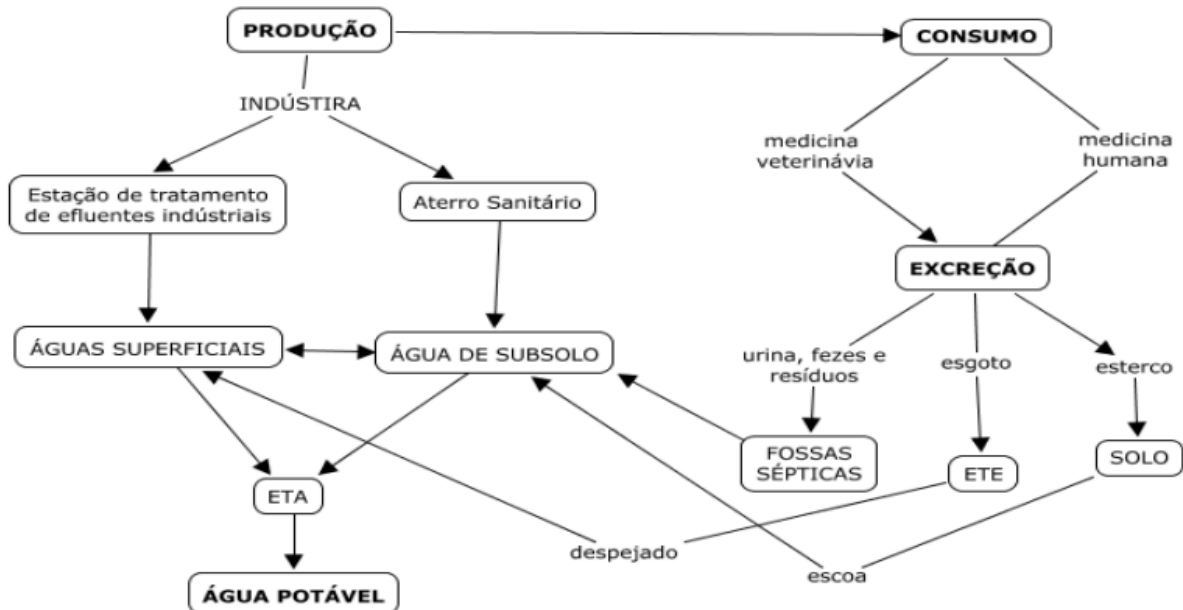
De acordo com Tordin (2018), os contaminantes emergentes ou poluentes emergentes, mais comumente chamados, são aqueles poluentes que não são removidos totalmente nos processos de tratamento de água para o consumo humano. Alguns exemplos destacados por Richardson e Kimura (2016) incluem nanomateriais, fármacos e hormônios esteroides, drogas ilícitas, produtos de higiene e beleza, microplásticos, microcistinas, toxinas das algas, líquidos iônicos, entre muitos outros. Segundo Tordin, o número de compostos considerados poluentes emergentes pode chegar a mil.

Segundo Cardoso (2019), é válido ressaltar que não é possível com a tecnologia das estações de tratamento de esgoto (ETEs) e estações de tratamento de água (ETAs), retirar a totalidade desse tipo de poluente, principalmente em casos específicos. Assim sendo, sabe-se que os poluentes também podem afetar a vida aquática (fauna e flora) e a saúde humana. Segundo Pescara (2014), o lançamento de efluentes de uma ETE foi o motivo da feminização de peixes, e alteração no desenvolvimento de moluscos e anfíbios, devido à presença de interferentes endócrinos na água. Ademais, estudos realizados comprovaram que a exposição do corpo humano aos contaminantes emergentes podem desencadear efeitos cancerígenos (Fontenele et al, 2010).

Pode-se observar na Figura 1 um esquema de como é possível que os poluentes

emergentes invadam a biota e corpos d'água.

Figura 1 - Possíveis rotas dos contaminantes emergentes até a natureza.

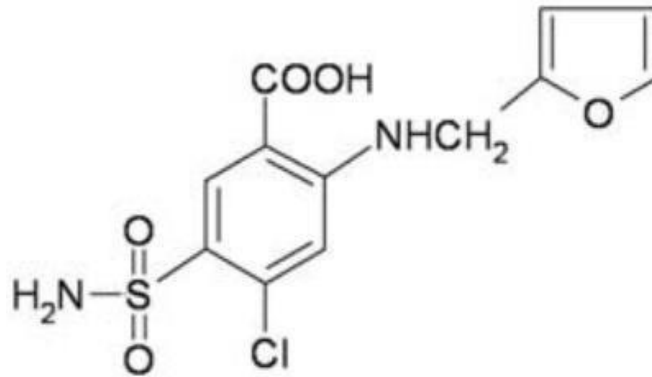


Fonte: Koerich (2015).

### 3.2.1 Fármaco Furosemida

A furosemida, como é mais comumente chamada, possui fórmula molecular  $C_{12}H_{11}ClN_2O_5S$  e o nome químico Ácido 4-cloro-2-(2-furilmetilamino)-5-sulfamoil-benzóico, segundo as regras de nomenclatura da IUPAC (*International Union of Pure and Applied Chemistry*). Ela também é muito conhecida pelo nome Lasix, sendo esse, o produto à base de furosemida referência do mercado. Na Figura 2 é possível observar a fórmula estrutural da furosemida.

Figura 2 – Fórmula estrutural da furosemida.



Fonte: Spricigo et al. (2008).

De acordo com Barbosa (2014), a furosemida é um diurético potente utilizado em casos emergenciais e de controle envolvendo hipertensão e edema pulmonar cardiogênico, sendo também utilizada no tratamento da broncoconstrição e dispneia (Kallet, 2007; Sahni e Phelps, 2011). Para Pérez e Cordoví (2014), também pode ser utilizado para crises asmáticas. Em outros casos, o fármaco também tem sido amplamente estudado para a utilização em animais, pois segundo Quamme (1986), citado por Kitamura e Ortolani (2007), a furosemida é o diurético mais utilizado para o tratamento de edemas em animais domésticos.

Segundo a informação do Sistema de Classificação Biofarmacêutica (SCB) citado por Barbosa (2014), a furosemida é pouco solúvel em água e possui baixa permeabilidade intestinal. Ainda conforme o autor, é por esse motivo que a biodisponibilidade para a absorção intestinal da substância é bem variável, mantendo-se entre 50 a 70%. Por ser um diurético de rápida eliminação do organismo (Adams, 2003), grande parte é eliminada juntamente à urina, e de acordo com a bula do Lasix (Sanofi-Aventis Farmacêutica Ltda), uma quantidade equivalente de 60% a 70% é excretada em forma de droga inalterada.

### 3.3 Processos de tratamento de água e esgoto no Paraná

A companhia responsável por tratar a água e o esgoto atualmente no Paraná é a SANEPAR (Companhia de Saneamento do Paraná). O sistema de tratamento utilizado na companhia inclui processos físicos e químicos, que no caso da SANEPAR, são considerados processos convencionais de tratamento de água. O tratamento realizado na SANEPAR basicamente abrange processos de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação.

Primeiramente, ocorre a captação de água do rio através de tubos adutores, que são encaminhadas para os primeiros tanques onde ocorre a coagulação das partículas. Nesse processo, com o auxílio de unidades de mistura rápida (sistemas hidráulicos ou mecanizados), o coagulante entra em contato direto com a água bruta captada no rio. Ela também pode ser feita através do medidor Parshall, que além de promover mistura rápida, serve para medir a vazão afluente à estação (HELLER; PÁDUA, 2006).

Posteriormente, a água é encaminhada para os tanques de floculação. Segundo Heller e Pádua (2006), o objetivo é que as partículas separadas na mistura rápida se agreguem, para que flocos maiores sejam formados e subsequentemente removidos. Logo em seguida, nos próximos tanques, a água passará pelo processo de decantação, no qual as partículas agregadas em flocos ficarão retidas pela ação da gravidade no fundo dos tanques.

No processo de filtração, o propósito é que ocorra a separação sólido-líquido nas unidades filtrantes. Na SANEPAR, ela é geralmente feita através de uma dupla camada de areia ou carvão antracito (SANEPAR, 2018).

Por fim, a desinfecção é feita com o intuito de remover os micro-organismos patogênicos que podem causar danos à saúde da população, como por exemplo bactérias, protozoários, vermes e vírus. De acordo com Heller e Pádua (2006), esse processo possui caráter corretivo e preventivo. No mesmo tanque é realizada a fluoretação, com a finalidade de equilibrar a concentração do íon fluoreto na água a fim de assegurar a saúde dental da população (SANEPAR, 2018).

Segundo Bila e Dezotti (2007), as águas do subsolo e superficiais podem ser contaminadas pela infiltração de substâncias através do solo provenientes da agricultura

ou até mesmo de áreas urbanas, e também pelo descarte de efluentes industriais e domésticos, pois as substâncias emergentes não são removidas totalmente nos processos convencionais de tratamento de água. Para Verlicchi et al. (2012), as estações não são eficientes e preparadas para o tratamento de fármacos em específico, pois elas estão somente preparadas para remover compostos mais biodegradáveis.

Assim como toda estação de tratamento de água, a SANEPAR necessita atender a legislação vigente. Nesse caso, a PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021 dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, de forma a estabelecer padrões nos parâmetros da água: pH, turbidez, quantidade bacteriológica, DQO, DBO, OD, cor verdadeira, fósforo total, nitrogênio amoniacal total, condutividade elétrica, entre muitos outros. Contudo, é possível observar que a legislação ainda não cita os contaminantes emergentes nessa vasta lista de parâmetros a serem levados em conta para o padrão de qualidade da água.

### **3.4 Eletrocoagulação**

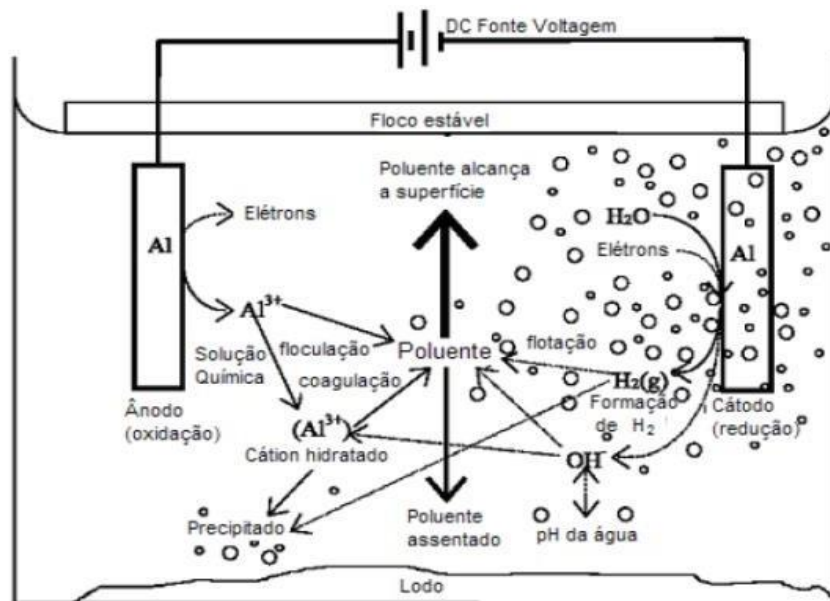
#### **3.4.1 Definições e reações envolvidas no processo**

De acordo Mollah et al. (2004), o processo de eletrocoagulação (EC) ocorre a partir do sacrifício do eletrodo, que através da oxidação fornece íons metálicos à água residuária, desencadeando uma desestabilização dos contaminantes e fazendo com que as partículas fiquem em suspensão. As fases desestabilizadas se agregam, formando flocos que podem ser removidos posteriormente através da sedimentação e filtração. Durante a EC, um potencial (que é proveniente de uma fonte externa de energia) é aplicado aos ânodos de metal. Como consequência, os metais são hidrolisados e formam agentes coagulantes *in situ*.

Segundo o que foi relatado por Bensadok et al. (2007), a eletrocoagulação acontece quando os ânodos sacrificiais de ferro ou alumínio sofrem a oxidação e dissolução no meio líquido. Por conseguinte, íons metálicos são liberados e se combinam aos íons hidroxila que foram gerados após eletrólise da água no cátodo, gerando

hidróxidos metálicos e flocos em suspensão. Para eles, a separação das partículas suspensas pode ser feita através da raspagem ou do processo de sedimentação. A Figura 3 representa as interações envolvidas em um processo de eletrocoagulação.

**Figura 3 - Interações envolvidas no reator eletrolítico no processo de EC.**



Fonte: Henriques (2004).

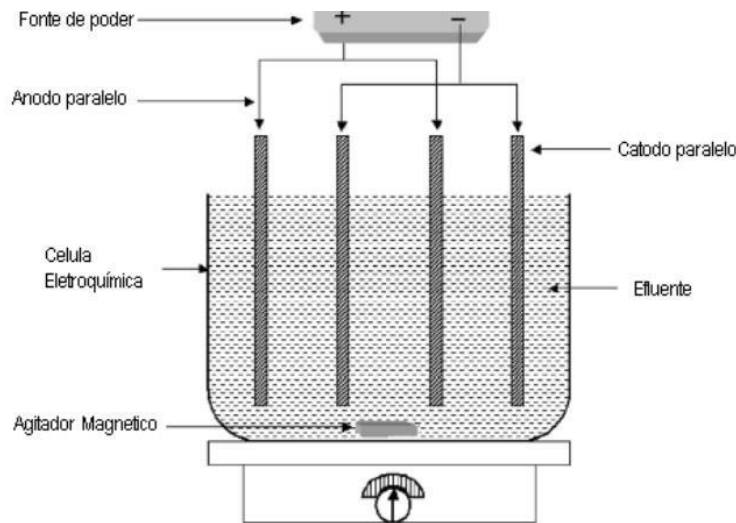
Holt et al. (2004) alegam que a eletrocoagulação é um processo utilizado regularmente nos cem últimos anos, ou talvez mais. De acordo com eles, é uma tecnologia eficiente capaz de remover uma gama de poluentes das águas residuárias, com um custo relativamente baixo. Segundo Bensadok et al. (2007), a EC já foi um processo de alto custo e competitivo em relação a outros processos químicos. Isso mudou com o avanço da tecnologia no que diz respeito a processos eletroquímicos, e quando as legislações ambientais tomaram uma posição mais severa quanto às águas residuárias, diminuindo consideravelmente seu custo de operação.

### 3.4.2 Variações dos reatores de eletrocoagulação

Para Mollah et al. (2004), são diversas as variações de reatores de eletrocoagulação existentes. Basicamente, elas podem variar de acordo com o tipo de poluentes predominante na água residuária, para que a eficiência atenda o melhor

desempenho o possível na remoção do poluente. Um exemplo de reator eletrolítico pode ser composto por um arranjo de eletrodos monopolares em paralelo ou em série. No esquema em paralelo, mostrado na Figura 4, são utilizadas duas placas de metal condutoras, que no caso, são os eletrodos sacrificiais, posicionadas entre dois eletrodos paralelos e uma fonte de alimentação externa.

**Figura 4 - Esquema de um reator de EC de bancada com eletrodos monopolares com conexões em paralelo.**

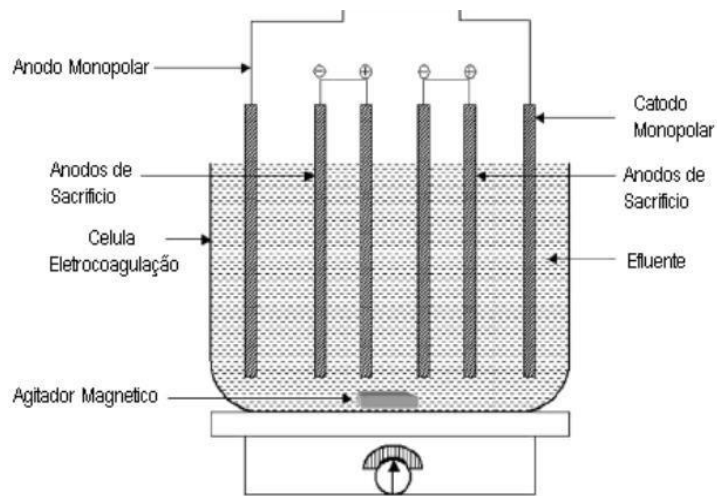


**Fonte: Mollah et al. (2004).**

Ainda em conformidade com Mollah et al. (2004), o reator em série (Figura 5) necessita de uma diferença de potencial maior do que o esquema em paralelo, pois as células em série possuem uma resistência maior. Nos arranjos monopolares, os pares de eletrodos sacrificiais estão sempre conectados, não havendo interação com os eletrodos externos.



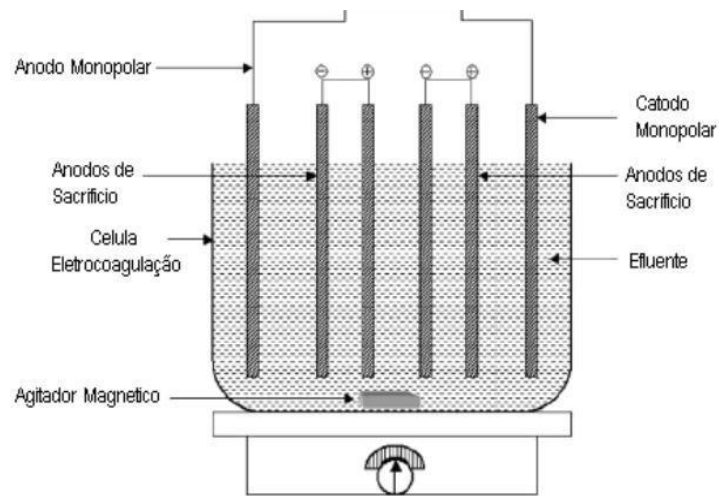
**Figura 5 - Esquema de um reator de EC de bancada com eletrodos monopolares com conexões em série.**



**Fonte: Mollah et al. (2004).**

Mollah et al. (2004) também cita a existência de reatores com células em paralelo, mas utilizando eletrodos bipolares. Basicamente os eletrodos sacrificiais e bipolares são posicionados entre dois eletrodos paralelos, mas o que difere é a ausência de conexão elétrica diretamente introduzida neles. Somente os eletrodos monopolares são conectados à uma fonte de energia, o que pode ser observado na Figura 6.

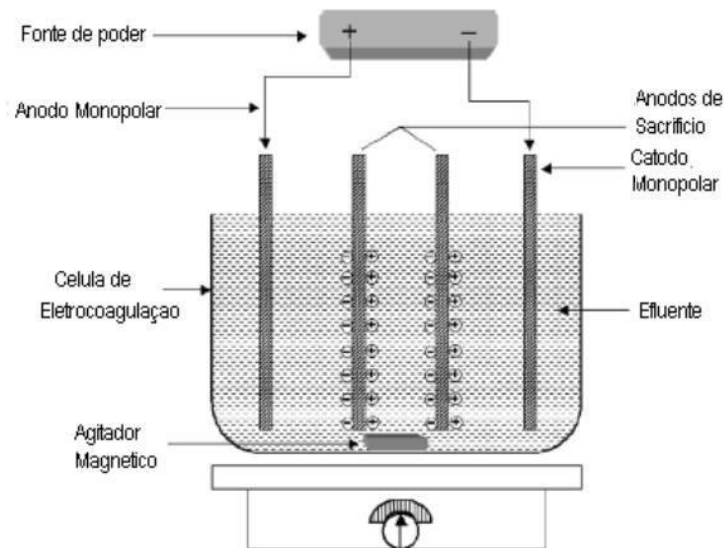
**Figura 6 - Esquema de um reator de EC de bancada com eletrodos monopolares com conexões em série.**



**Fonte: Mollah et al. (2004).**

Mollah et al. (2004) também cita a existência de reatores com células em paralelo, mas utilizando eletrodos bipolares. Basicamente os eletrodos sacrificiais e bipolares são posicionados entre dois eletrodos paralelos, mas o que difere é a ausência de conexão elétrica diretamente introduzida neles. Somente os eletrodos monopolares são conectados à uma fonte de energia, o que pode ser observado na Figura 7.

**Figura 7 - Esquema de um reator de EC de bancada com eletrodos bipolares com conexões em paralelo.**



Fonte: Mollah et al. (2004).

A eficiência de um reator está inteiramente ligada ao estado operacional dos eletrodos, que pode variar de acordo com o material utilizado, design do reator, e seus arranjos. Para cada tipo de água residuária contendo diferentes tipos de poluentes, é recomendado que se faça adaptações no arranjo do reator para um melhor desempenho, de acordo com a necessidade (Ogutveren et al., 1992; Barkley et al., 1993) citado por Holt et al. (2004).

### 3.4.3 Aplicações da eletrocoagulação associados a poluentes em geral e poluentes emergentes

Alguns estudos demonstraram certa eficiência na utilização do processo de eletrocoagulação na remoção de contaminantes emergentes. Na análise feita por Takdastan et al. (2016), por exemplo, foi realizado um experimento de EC com um tanque de 2 litros e reator de método bipolar em um arranjo contendo quatro placas de metal (eletrodo de alumínio), para a remoção de detergente e fosfato provenientes de produtos da lavagem de carros. Como resultado final, concluiu-se que o processo foi capaz de remover em média 93% do detergente, e 78% de fosfato presentes no efluente.

Já no trabalho realizado por Santolin et al. (2015), a eletrocoagulação utilizando

eletrodos de alumínio foi capaz de diminuir drasticamente a concentração de ciprofloxacina (antibiótico sintético da classe fluoroquinolona) presente no efluente, em 98,2%. Segundo os autores, esse medicamento é amplamente prescrito para casos de infecção, pois combate uma série de bactérias gram-positivas e gram-negativas.

Também foi possível através de outras análises concluir que a EC é capaz de remover ou diminuir a quantidade de alguns parâmetros das águas residuárias. Em seu experimento, Brächer (2018), realizou vários ensaios com amostras de esgoto doméstico, utilizando um reator cilíndrico de acrílico e eletrodos de alumínio. Após obter alguns resultados dos ensaios executados, o autor conseguiu definir as melhores condições para a remoção dos parâmetros de seu efluente. Dessa forma, chegou à conclusão de que a EC em conjunto com a flotação foi capaz de remover altos níveis decor aparente (97,9%), DQO (82,9%), turbidez (95,8%), sólidos totais (66,9%) e fósforo ortofosfato (> 98,2%).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Localização dos experimentos do estudo

O presente estudo foi realizado na cidade de Londrina – PR. A preparação da água sintética foi feita no Laboratório de Recursos Hídricos, localizado no bloco S da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR.

### 4.2 Preparação da água sintética

A água do estudo foi preparada com o uso de comprimidos de 40 mg de teor de furosemida, produzidos pela indústria farmacêutica Teuto (Figura 8), e foi preparada de acordo com o método da AOAC - *Association of Official Analytical Chemists* (1995).

Figura 8 - Fármaco furosemida utilizado no estudo.



Fonte: Autoria própria.

A dosagem de furosemida foi determinada pelo método espectrofotométrico, no qual foi utilizado o espectrofotômetro de modelo UV – 1601PC da marca Shimadzu para

a medição da quantidade de luz absorvida pela solução, como pode ser observado na Figura 9.

**Figura 9 - Espectrofotômetro utilizado no estudo.**

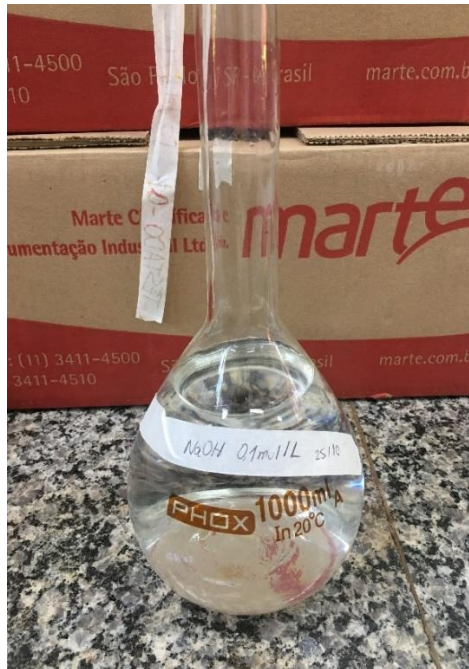


**Fonte: Autoria própria.**

### **4.3 Preparo da solução de NaOH 0,1 mol/L**

Primeiramente, foi preparado a solução NaOH 0,1 mol/L (Figura 10);

**Figura 10 - Solução NaOH 0,1 mol/L.**



**Fonte: Autoria própria.**

Considerando que a massa molar de NaOH equivale a 40 g/mol, foi calculado a massa (g) necessária para o preparo de 1 L de solução NaOH 0,1 mol/L, através da Equação 1:

$$M = \frac{m}{MM.V}$$

Sendo:

M = Molaridade (mol/L)

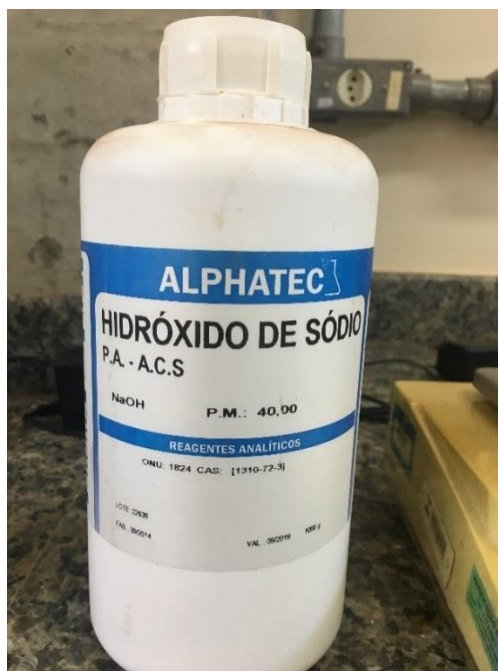
m = Massa (g)

MM = Massa molar (g/mol)

V = Volume (L)

Dessa forma, chegou-se ao valor de massa de 4 g de NaOH. A marca utilizada foi a Alphatec, como pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Hidróxido de sódio utilizado no estudo.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.4 Preparo das soluções padrão

Posteriormente, foi calculada a massa (g) de furosemida a ser pesada para o preparo de uma solução de 100 mL a 0,1 mg/mL, 0,2 mg/mL e 0,3 mg/mL.

Para o cálculo da massa, foi feita uma regra de três simples, na qual 800 mg do princípio ativo de furosemida (20 comprimidos) equivalem a 4,013 g. Dessa forma, as massas (g) utilizadas para o preparo de cada solução padrão estão evidenciadas na Tabela 1.

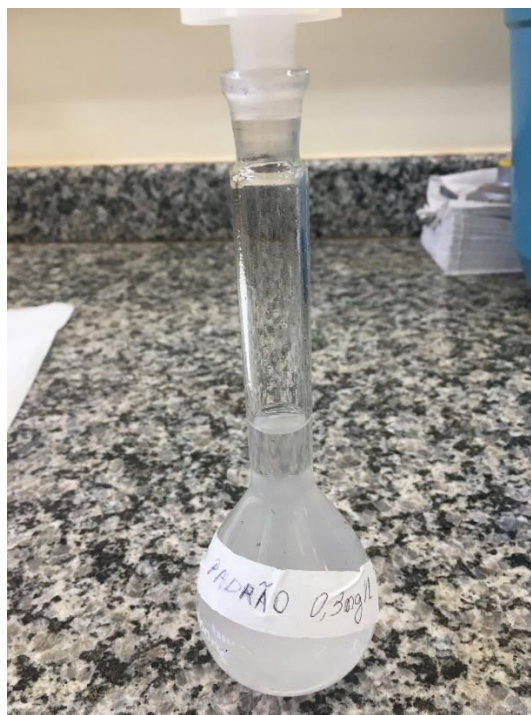


**Tabela 1 - Massas utilizadas para o preparo das soluções padrão.**

Solução padrão (mg/mL)	Furosemida (mg)	Massa pesada (g)
0,1	10	0,05016
0,2	20	0,10033
0,3	30	0,15048

Fonte: Autoria própria.

A massa molar da furosemida considerada foi igual a 330,75 g/mol, sendo este, levando em consideração o valor determinado por Merck (2001). Os padrões de furosemida bruta 0,1 mg/mL, 0,2 mg/mL e 0,3 mg/mL (Figura 12) foram preparados em um balão volumétrico de 100 mL. Foram adicionados 25 mL de NaOH 0,1 mol/L. Logo após, o balão foi completado com água destilada.

**Figura 12 - Solução padrão 0,3 mg/L.**

Fonte: Autoria própria.

## 4.5 Preparo das amostras para a confecção da curva de calibração

### 4.5.1 Preparo da solução estoque de furosemida

Em primeiro lugar, foi pesado individualmente e calculado o peso médio de 20 comprimidos.

Com um pistilo e um almofariz de porcelana, os comprimidos foram macerados até a obtenção de um pó fino;

Depois, foi pesado a massa média de um comprimido (aproximadamente 0,2 g) o equivalente a 40 mg do princípio ativo de furosemida, e adicionado 25 mL de NaOH 0,1 mol/L. Em seguida, deixou-se a amostra em repouso por 30 minutos com agitação ocasional.

O próximo passo foi filtrar utilizando 3 papéis filtro Quanty de filtração lenta da indústria comercial JProLab. Ele possui especificações de 12,5 cm de diâmetro, permeabilidade ao ar de 3 l/s.m<sup>2</sup> e poros de 8 µm, que pode ser observado na Figura 13 abaixo.

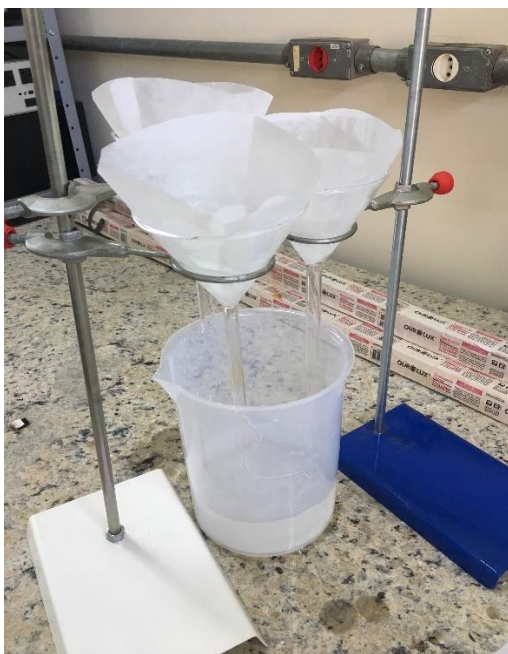
Figura 13 - Papel filtro utilizado na filtração.



Fonte: Autoria própria.

Também foram utilizados 2 suportes universais para que 3 funis de vidro fossem suspensos e ajudassem na filtração, como pode ser observado na Figura 14.

**Figura 14 - Processo de filtração.**



**Fonte: Autoria própria.**

Em seguida, o filtrado foi transferido para um balão volumétrico e completado para 100 mL com água deionizada e rotulado com solução estoque de furosemida.

#### 4.5.2 Preparo das soluções diluídas de furosemida

Foi transferido 1,0 mL da solução estoque de furosemida para um balão volumétrico de 100 mL e adicionado 25 mL de NaOH 0,1 mol/L, completando o volume com água destilada (AOAC, 1995). O mesmo foi feito transferindo 2,0 mL, 3,0 mL, 4,0 mL e 5,0 mL da solução estoque, respectivamente, para quatro balões volumétricos de 100 mL, para totalizar as 5 soluções de furosemida em diferentes concentrações necessárias para a confecção da curva de calibração.

#### 4.6 Confeção da curva de calibração da solução de furosemida e análise da amostra

Para que a confecção da curva de calibração das soluções de furosemida fosse feita, foi levado em consideração a concentração de cada solução diluída em (mg/mL), e o valor da absorbância de cada uma. É possível observar o “branco” (solução sem a concentração de furosemida) e as amostras 1 a 5 na Figura 15.

**Figura 15 - Soluções de furosemida diluídas para confecção da curva de calibração.**



**Fonte: Autoria própria.**

É importante ressaltar que a absorbância foi medida no comprimento de onda 268 nm. Os dados obtidos podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2 - Tabela de apoio à confecção da curva de calibração e análise da amostra.

Balão	Padrões de furosemida (mL)	Volume NaOH 0,1 mol/L (mL)	H2O deionizada	Padrão (mg/mL)	Absorbância (nm)
Branco	-	25		0	-
1	1	25	Completado até 100 mL	0,003	0,079
2	2	25		0,006	0,157
3	3	25		0,009	0,242
4	4	25		0,012	0,328
5	5	25		0,015	0,411

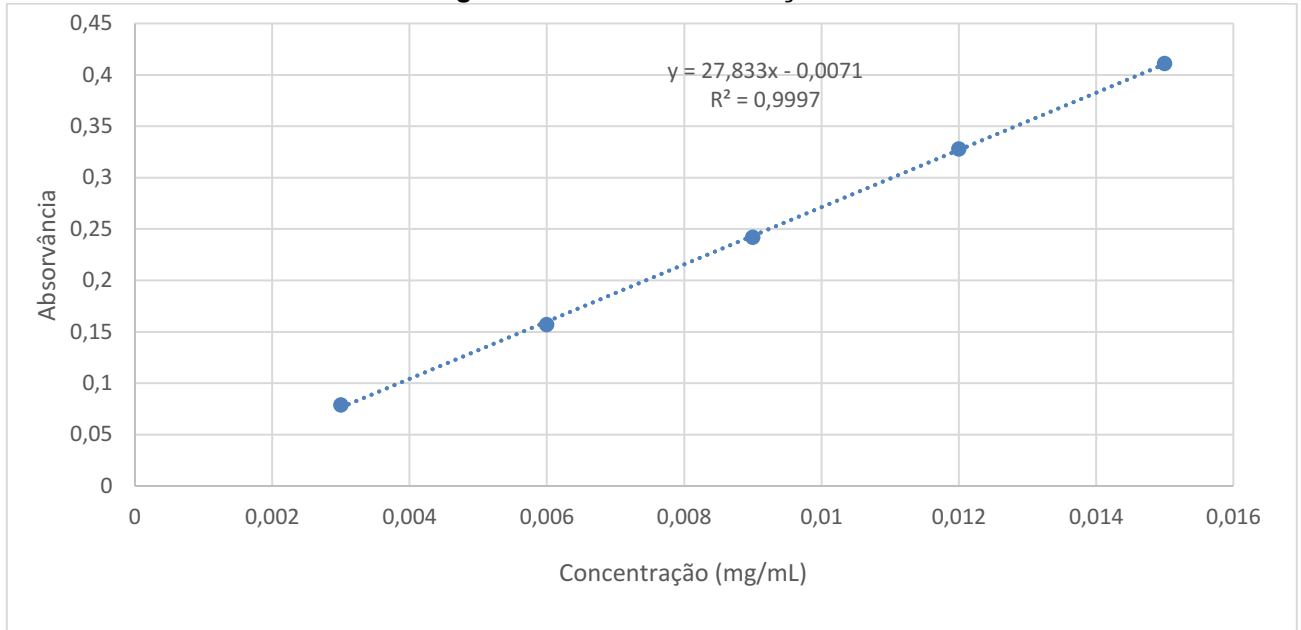
Fonte: Autoria própria.

Com os dados da Tabela 1 foi possível confeccionar a curva de calibração A x C (mg/mL) presente na Figura 16, utilizando os dados de concentração padrão de cada amostra em relação à sua absorbância. Dessa forma, chegou-se à Equação 2.

$$y = 27,833x - 0,0071$$

A partir da curva e da equação da reta obtida foi possível subsequentemente determinar o valor de concentração de furosemida do eixo X, substituindo o valor da absorbância da amostra no eixo Y.

**Figura 16 - Curva de calibração.**



Fonte: Autoria própria.

#### 4.7 Preparo de amostras brutas para eletrocoagulação

Primeiramente, foi utilizado a Equação 3 para determinar a concentração e massa a ser pesada para o preparo da amostra bruta de furosemida.

$$C = \frac{m}{V}$$

Sendo:

C = concentração (mg/mL)

m = massa (mg)

V = volume (mL)

Conforme a quantidade de ensaios definidos pelo planejamento estatístico, foi definido um volume de 2000 mL de solução de furosemida e na concentração desejada de 0,3 mg/mL, chegou-se ao resultado da necessidade de 600 mg de furosemida.

Através de uma regra de três simples, determinou-se que 600 mg do princípio ativo

de furosemida equivaliam aproximadamente 3,01 g de massa total do medicamento.

O mesmo procedimento foi feito para determinar as massas que foram utilizadas para o preparo de uma amostra contendo 0,1 mg/mL e 0,2 mg/mL.

A Tabela 3 apresenta a massa utilizada para o preparo de cada amostra bruta contaminada com a furosemida.

**Tabela 3 - Massas utilizadas para o preparo das amostras brutas contaminadas com furosemida.**

<b>Concentração da amostra</b>		
<b>(mg/mL)</b>	<b>Massa de furosemida (mg)</b>	<b>Massa total pesada (g)</b>
0,1	200	1
0,2	400	2,01
0,3	600	3,01

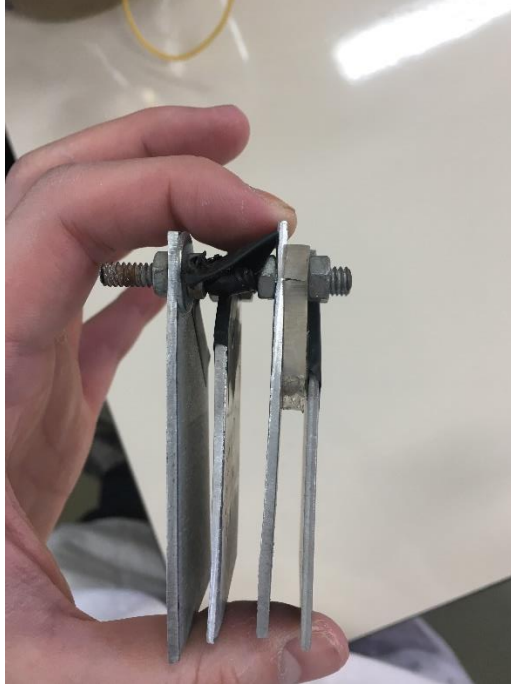
**Fonte: Autoria própria.**

A quantidade de NaOH utilizada na solução também foi calculada por uma regra de três simples, onde 25 mL de NaOH a 0,1 mol/L foi necessária para uma solução de 100 mL. Dessa forma, para uma solução de 2000 mL, foi preciso utilizar 500 mL de NaOH 0,1 mol/L.

#### **4.8 Reator de eletrocoagulação**

A montagem do reator de eletrocoagulação foi baseada no modelo utilizado por Theodoro (2010), sendo formado por um Becker de vidro de 150 mL, um sistema de eletrodos monopolares composto por quatro placas de alumínio acopladas em paralelo (Figura 17).

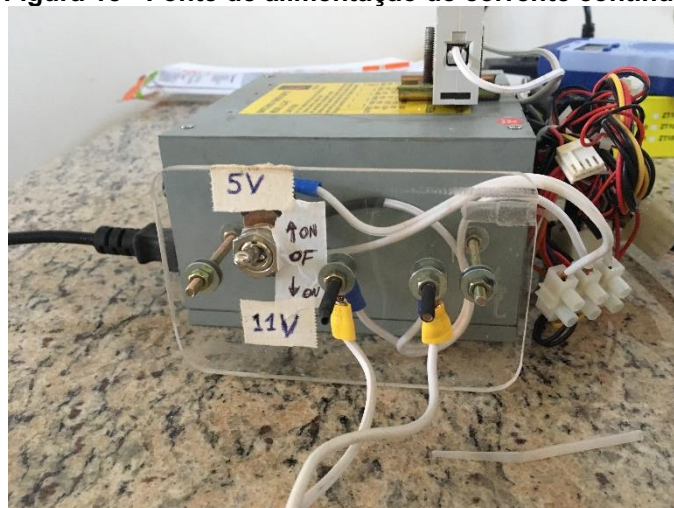
**Figura 17 - Eletrodo com placas de alumínio em paralelo.**



**Fonte: Autoria própria.**

O sistema também possuía um agitador magnético de uma fonte de alimentação de corrente contínua variando em 5 Volts e 11 Volts, como mostra a Figura 18.

**Figura 18 - Fonte de alimentação de corrente contínua.**

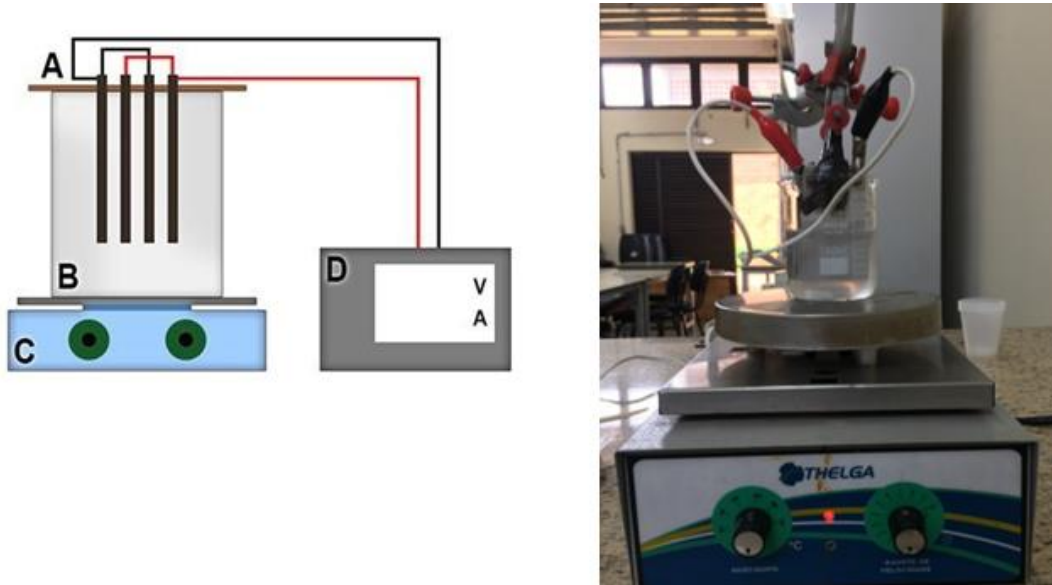


**Fonte: Autoria própria.**



Na Figura 19, pode ser observado o aparato que foi utilizado no experimento.

**Figura 19 - Reator de eletrocoagulação em nível de bancada. A) Sistema de eletrodos; B) Recipiente de vidro; C) Agitador magnético; D) Fonte de corrente elétrica.**



Fonte: Autoria própria.

As quatro placas de alumínio, que se referem aos eletrodos, foram dispostas em paralelo e de forma equidistante, com 1 cm entre eles. As placas possuem 7,5 cm de altura, 4 cm de largura, 3 mm de espessura, e foram fixadas por parafusos.

A fonte externa de alimentação que foi utilizada no experimento é da marca *Bluecase* e tem capacidade de fornecer uma tensão de 11 V e 5 V. O sistema de agitação magnética foi realizado com um agitador da marca *Thelga* e uma barra magnética. A constante agitação durante a eletrocoagulação permite a maior distribuição dos agentes coagulantes formados, promovendo maior eficiência na desestabilização dos coloides e formação de mais flocos.

#### 4.9 Planejamento experimental

O planejamento estatístico foi do tipo fatorial fracionário levando em consideração duas variáveis: concentração da amostra sintética bruta de furosemida (mg/mL), e tempo (minutos) de eletrólise. Os ensaios ocorreram sob dois valores de tensão de corrente

contínua diferentes: 11 V e 5 V. A resposta foi a concentração de furosemida remanescente. As concentrações foram calculadas a partir da leitura das absorvâncias com a equação da curva de calibração, sendo também medidos o valor da corrente (A) do sistema, e o pH final, após cada processo de EC.

A Tabela 4 representa o planejamento fatorial estatístico com dois fatores (variáveis independentes), concentração da amostra bruta e tempo de eletrocoagulação, com 3 níveis (-1,0,1). Para a concentração, os níveis indicam 0,1 mg/mL, 0,2 mg/mL e 0,3 mg/mL de furosemida, respectivamente. Para o tempo, os níveis (-1,0,1) indicam o tempo de eletrocoagulação: 10, 20 e 30 minutos, respectivamente. Os testes foram realizados em duplicata e os resultados podem ser observados no Apêndices 1 e 2.

**Tabela 4 - Planejamento fatorial para o tratamento da água de estudo pelo processo de eletrocoagulação.**

Planejamento Estatístico			Resposta			
Ensaio	Concentração (mg/mL)	Tempo (min)	Amperagem	pH	Absorvância	Furosemda
					(abs)	removida (mg/mL)
1	0,1	10				
2	0,1	20				
3	0,1	30				
4	0,2	10				
5	0,2	20				
6	0,2	30				
7	0,3	10				
8	0,3	20				
9	0,3	30				
10	0,1	10				
11	0,1	20				
12	0,1	30				
13	0,2	10				
14	0,2	20				
15	0,2	30				
16	0,3	10				
17	0,3	20				
18	0,3	30				

Fonte: Autoria própria.

#### 4.10 Cálculo de eficiência de remoção

Para efetuar o cálculo da eficiência de remoção do parâmetro analisado após a aplicação da eletrocoagulação foi usada a Equação 4:

$$E_{\text{remoção}} = \left( \frac{C_i - C_f}{C_i} \right) \times 100$$

Onde:

$E_{\text{remoção}}$  = eficiência de remoção (%);

$C_i$  = concentração inicial de furosemida mg/L;

$C_f$  = concentração final de furosemida mg/L.

#### 4.11 Cálculo do desgaste dos eletrodos (mel)

Em um reator de eletrocoagulação, a quantidade de material dos eletrodos consumido durante as reações eletroquímicas está diretamente relacionada com a diferença de potencial aplicada (ddp) entre os dois eletrodos. Uma maior ddp, ou voltagem elétrica, resulta em uma maior intensidade de corrente, que vai ter influência na massa de eletrodo consumido no processo, conforme demonstrado nas Lei de Faraday através da Equação 4:

$$\text{mel} = \frac{i \cdot t \cdot M}{F \cdot n}$$

Sendo:

mel = desgaste dos eletrodos ( $\text{kg/m}^3$ );

t = tempo de aplicação da corrente(s);

M = massa molar do elemento que constitui o eletrodo ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ );

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

F = constante de Faraday ( $9,65 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$ ).

#### 4.12 Consumo de energia elétrica

O consumo de energia elétrica necessário para realização do ensaio foi

mensurado utilizando a Equação 5:

$$C = \frac{U \cdot i \cdot t}{V}$$

Sendo:

C = consumo elétrico (kW.h/m<sup>3</sup>)

U = tensão aplicada (V);

i = corrente aplicada (A);

t = tempo de aplicação (h);

V = volume de efluente tratado (m<sup>3</sup>).

#### 4.13 Custo de operação

O custo de operação necessário para realização do ensaio foi medido utilizando a Equação 6:

$$C_{oper} = a \cdot C_{energ} + b \cdot C_{elet}$$

Onde:

Coper = custo total de operação do sistema (R\$.m<sup>-3</sup>);

a = custo de energia elétrica (R\$.kWh<sup>-1</sup>);

Cenerg = consumo de energia elétrica (kWh.m<sup>-3</sup>);

b = custo dos eletrodos (R\$.kg alumínio<sup>-1</sup>);

Celet = consumo do eletrodo (kg.m<sup>-3</sup> água tratada).

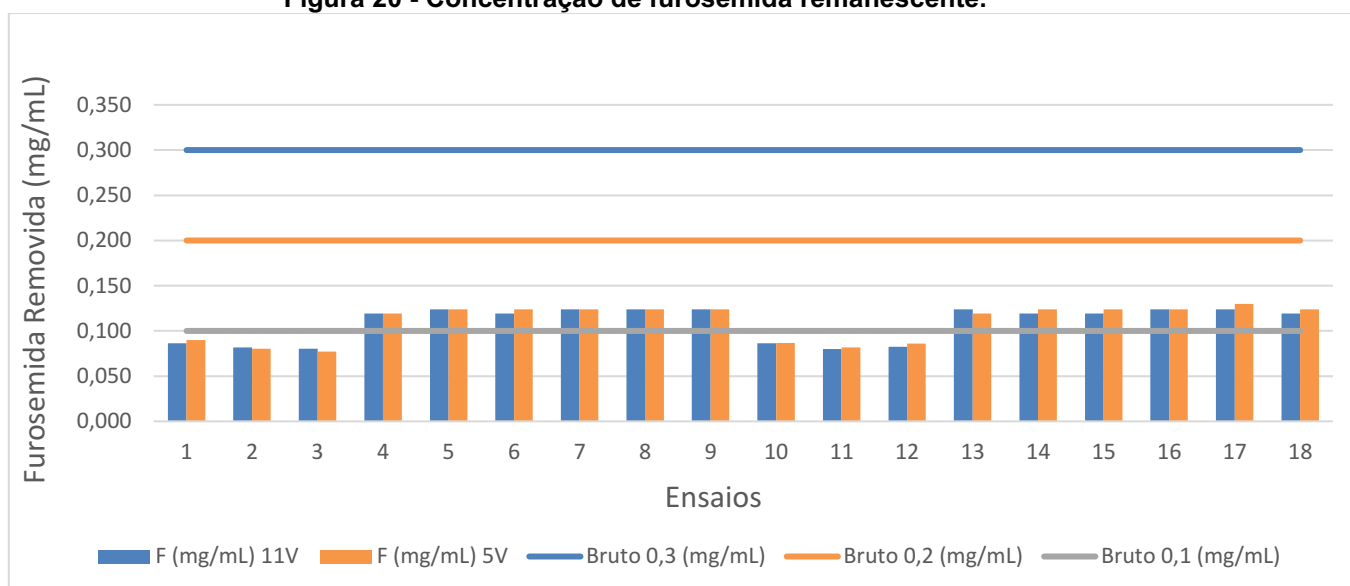
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Remoção de furosemida

A partir da curva de calibração demonstrada na Figura 16, descobriu-se a Equação 2 da reta  $y = 27,833x - 0,0071$ . Consequentemente, substituindo no eixo Y o valor das absorbâncias obtidas na leitura do espectrofotômetro, foi possível estimar o valor X, que é o valor da concentração de furosemida removida da amostra.

A Figura 20, compara a concentração de furosemida removida no processo de eletrocoagulação nas duas diferentes tensões: 11 Volts e 5 Volts. Considera-se que “F (mg/mL)” representa a concentração de furosemida removida e as linhas horizontais denominadas “Bruto” são as concentrações das amostras da água contaminada bruta.

Figura 20 - Concentração de furosemida remanescente.



Fonte: Autoria própria.

A remoção da substância em ambas as voltagens foi parecida, indicando que não houve diferença muito significativa entre elas. Ainda, pode-se observar que os ensaios 1, 2, 3, 10, 11 e 12 foram os que obtiveram menor resposta de furosemida removida em relação aos outros.

A menor resposta de furosemida removida provavelmente está associada à concentração bruta da solução de todos esses ensaios, a menor do planejamento

experimental. Os ensaios 1 e 10 possuem concentração bruta e tempo de eletrocoagulação de 0,1 mg/mL e 10 minutos, respectivamente. Já os ensaios 2 e 11 apresentam concentração de 0,1 mg/mL e tempo de 20 minutos. Por fim, os ensaios 3 e 12 representam um planejamento experimental de 0,1 mg/mL e 30 minutos de eletrocoagulação. Esses ensaios possuem menor teor da substância absorvida na água disponível para remoção. Os dados dos ensaios em destaque estão evidenciados na Tabela 5.

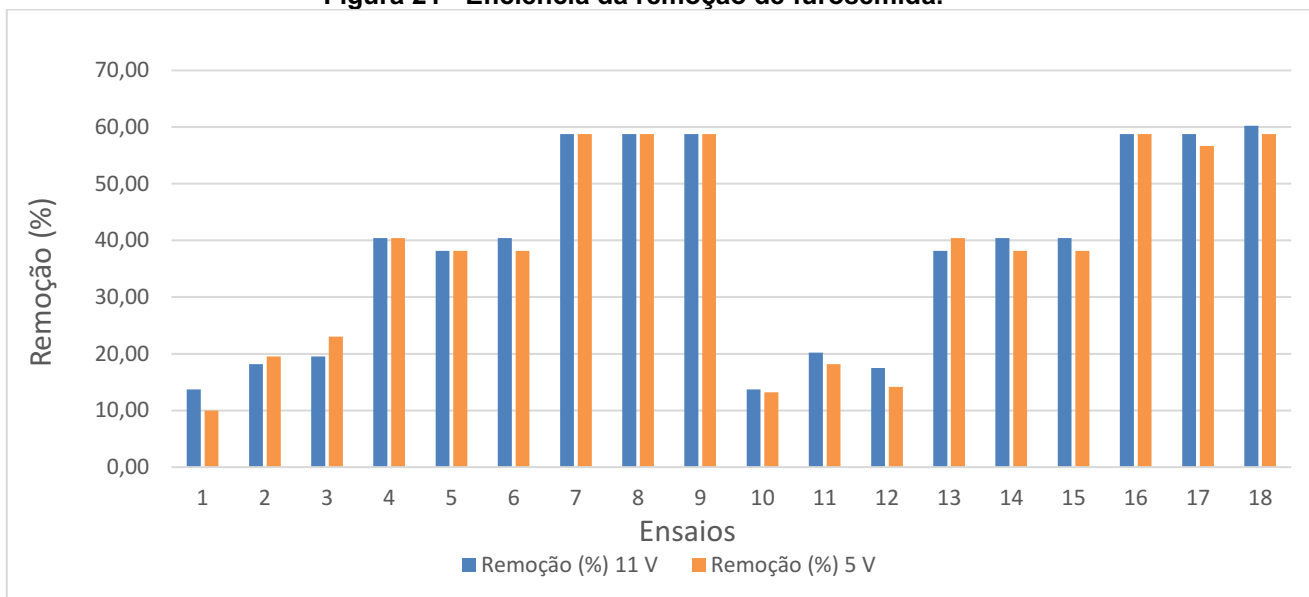
**Tabela 5 - Planejamento experimental dos ensaios em destaque.**

Ensaio	Planejamento Experimental	Concentração da solução bruta (mg/mL)	Tempo de eletrocoagulação (min)
1	(-1;-1)	0,1	10
2	(-1;0)	0,1	20
3	(-1;1)	0,1	30
10	(-1;-1)	0,1	10
11	(-1;0)	0,1	20
12	(-1;1)	0,1	30

**Fonte: Autoria própria.**

Dessa forma, a Figura 21 evidencia a eficiência de remoção da furosemida levando em conta a concentração removida em relação à concentração total da sua amostra bruta, conforme o planejamento do item 4.7.

**Figura 21 - Eficiência da remoção de furosemida.**



**Fonte: Autoria própria.**

A Figura 21 demonstra claramente que a concentração da amostra bruta interferiu fortemente na eficiência da remoção de furosemida em cada ensaio.

Em conformidade com a Figura 21, os ensaios 1, 2, 3, 10, 11 e 12 foram os que menos apresentaram eficiência na remoção da furosemida, sendo que estes, são aqueles que possuíam a concentração de 0,1 mg/mL de furosemida. O maior valor de porcentagem de remoção para os ensaios dessa concentração foi de 23,4% no ensaio 3, submetido à 5 Volts com tempo de eletrocoagulação de 30 minutos.

Já os ensaios 4, 5, 6, 13, 14 e 15, apresentaram uma eficiência de remoção um pouco maior em comparação aos citados anteriormente. Isso pode estar relacionado à concentração da amostra bruta, que para esses ensaios, foi de 0,2 mg/mL. O maior valor de eficiência de remoção da furosemida atingido para esses ensaios foi de 40,4%, como resultado de seis ensaios: 4 à tensão de 5 e 11 Volts; 6 submetido à 11 Volts; 13 submetido à 5 Volts; 14 submetido à 11 Volts; 15 submetido à 11 Volts.

Além disso, alguns ensaios obtiveram uma eficiência de remoção da furosemida ainda maior. É o caso dos ensaios 7, 8, 9, 16, 17 e 18, que possuíam a maior concentração do fármaco na amostra bruta (0,3 mg/mL). O melhor resultado obtido foi no ensaio 18, o qual foi submetido à uma tensão de 11 Volts e teve tempo de eletrocoagulação de 30 minutos, resultando em uma remoção de furosemida de 60,26%.



Levando em conta o estudo de remoção do poluente emergente ciprofloxacina utilizando a EC apresentado por C. SANTOLIN et. al (2015), a eficiência pôde ser aumentada abaixando o pH do ensaio para 3,0 e aumentando o tempo do processo.

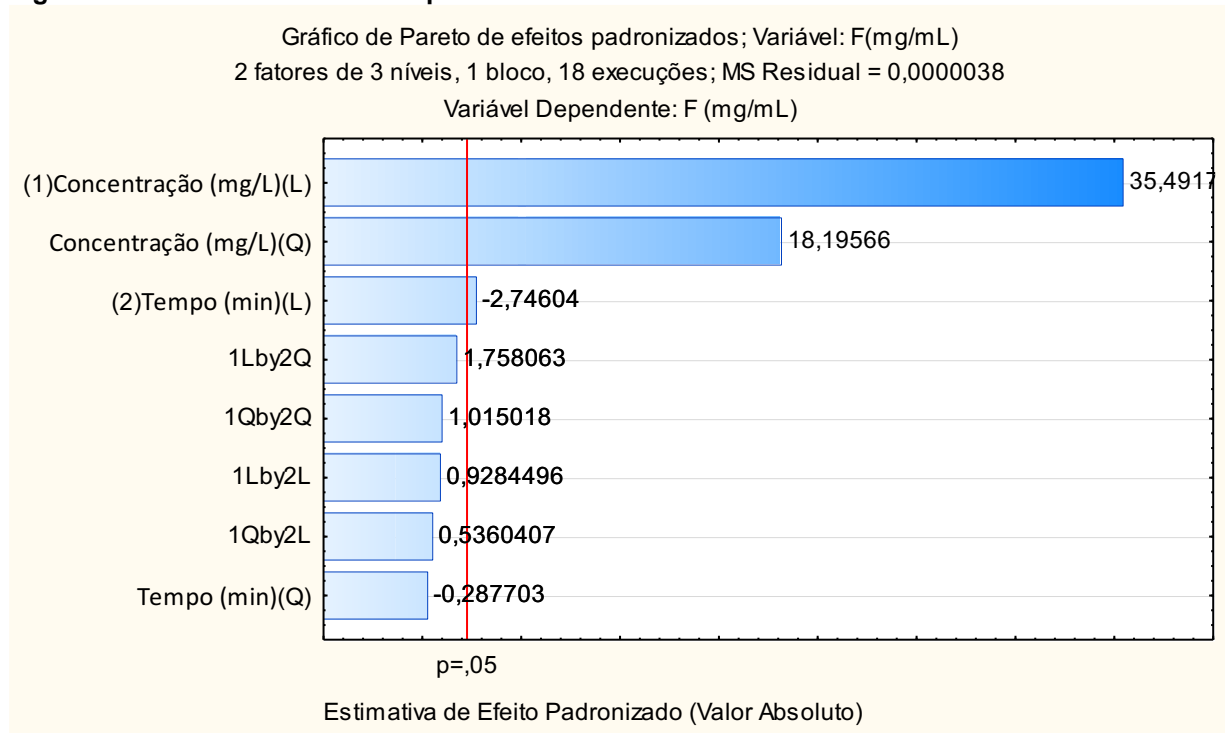
Já no trabalho de Behling (2021), a eficiência pôde ser aumentada pelo uso da EC associada à peroxidação, onde foi utilizado o oxidante peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) para potencializar a remoção dos fármacos e contaminantes emergentes Ibuprofeno e Diclofenaco de sódio.

## 5.2 Análise estatística

Para a análise estatística dos ensaios realizados neste trabalho, foi utilizado o Software STATISTICA versão 10 (2011). A partir dele, foi possível gerar os gráficos de Pareto, responsáveis por indicar as variáveis independentes que mais contribuíram para a remoção da furosemida da amostra. Também foram geradas as tabelas ANOVA, que determinam as variáveis que obtiveram desempenho mais significativo para a remoção de furosemida nos ensaios por meio da análise de variância, onde cada elemento amostral é independente. Por fim, gerou-se os gráficos de superfície de resposta de eixo x, y e z, que facilitam a leitura do comportamento da remoção de furosemida em relação à concentração da amostra bruta e tempo de eletrocoagulação.

A Figura 22 traz consigo o gráfico de Pareto levando em conta as variáveis independentes de concentração e tempo após a EC utilizando a tensão de 11 Volts, sendo a sigla “F” designada para representar a concentração de furosemida não removida. As variáveis representadas por (L) são lineares, e as representadas por (Q) são quadráticas.

**Figura 22 – Gráfico de Pareto do processo de EC a 11 Volts.**

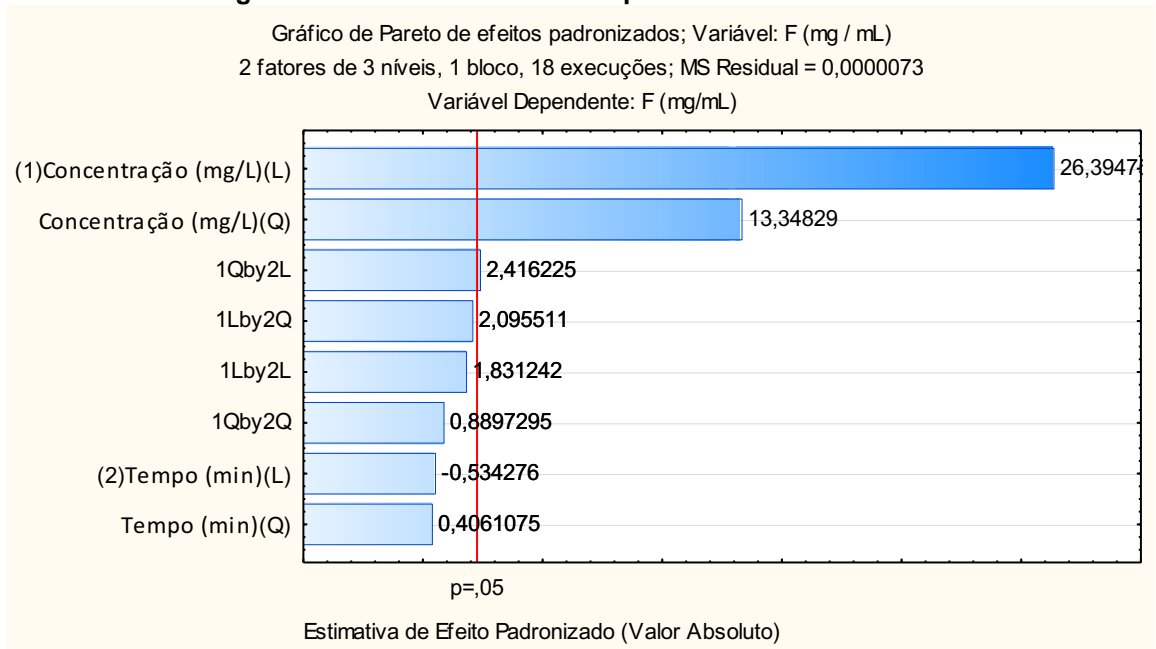


**Fonte: Autoria própria.**

De acordo com a Figura 22, ambas as variáveis concentração e tempo foram significativas para a remoção da furosemida. O destaque é a concentração da amostra, que em conformidade com a Figura 20, exerce papel de amplo efeito sobre o processo.

Na Figura 23, pode-se observar o gráfico de Pareto com as variáveis independentes utilizadas na EC a 5 Volts.

**Figura 23 - Gráfico de Pareto do processo de EC a 5 Volts.**



**Fonte: Autoria própria.**

Nesse caso, a Figura 23 demonstrou que a maior contribuição para a eliminação de furosemida foi unicamente a variável de concentração da amostra bruta. Quanto maior o seu valor, é provável que uma maior quantidade de furosemida será removida no processo de EC.

Na Figura 24, está representada a Tabela ANOVA com as variáveis independentes da EC a 11 V, utilizadas no software (concentração e tempo), sendo a furosemida removida a variável dependente.

**Figura 24 - Tabela ANOVA do processo de EC a 11 Volts.**

ANOVA; Var.:F (mg/mL); R-sqr=,99442; Adj:,98946 (Spreadsheet1) 2 3-level factors, 1 Blocks, 18 Runs; MS Residual=,0000038 DV: F (mg/mL)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Concentração (mg/L)(L)	0,004822	1	0,004822	1259,663	0,000000
Concentração (mg/L)(Q)	0,001267	1	0,001267	331,082	0,000000
(2)Tempo (min)(L)	0,000029	1	0,000029	7,541	0,022623
Tempo (min)(Q)	0,000000	1	0,000000	0,083	0,780089
1L by 2L	0,000003	1	0,000003	0,862	0,377403
1L by 2Q	0,000012	1	0,000012	3,091	0,112605
1Q by 2L	0,000001	1	0,000001	0,287	0,604923
1Q by 2Q	0,000004	1	0,000004	1,030	0,336606
Error	0,000034	9	0,000004		
<b>Total SS</b>	<b>0,006173</b>	<b>17</b>			

Fonte: Autoria própria.

Segundo os dados destacados em vermelho (Figura 24), a Tabela ANOVA também confirma (considerando  $p < 0,05$ ) que os parâmetros concentração e tempo foram significativos para que a furosemida fosse removida da amostra bruta. As variáveis do processo com P-Valor menor que 5 ( $p < 5$ ) mostram que essas variáveis apresentaram influência de grande importância ao resultado final do processo.

Por outro lado, também considerando  $p < 0,05$ , a Tabela ANOVA do processo a 5 V indicou que o parâmetro mais significativo foi a concentração da amostra bruta. Os dados estão retratados na Figura 25.

**Figura 25 - Tabela ANOVA do processo de EC a 5 Volts.**

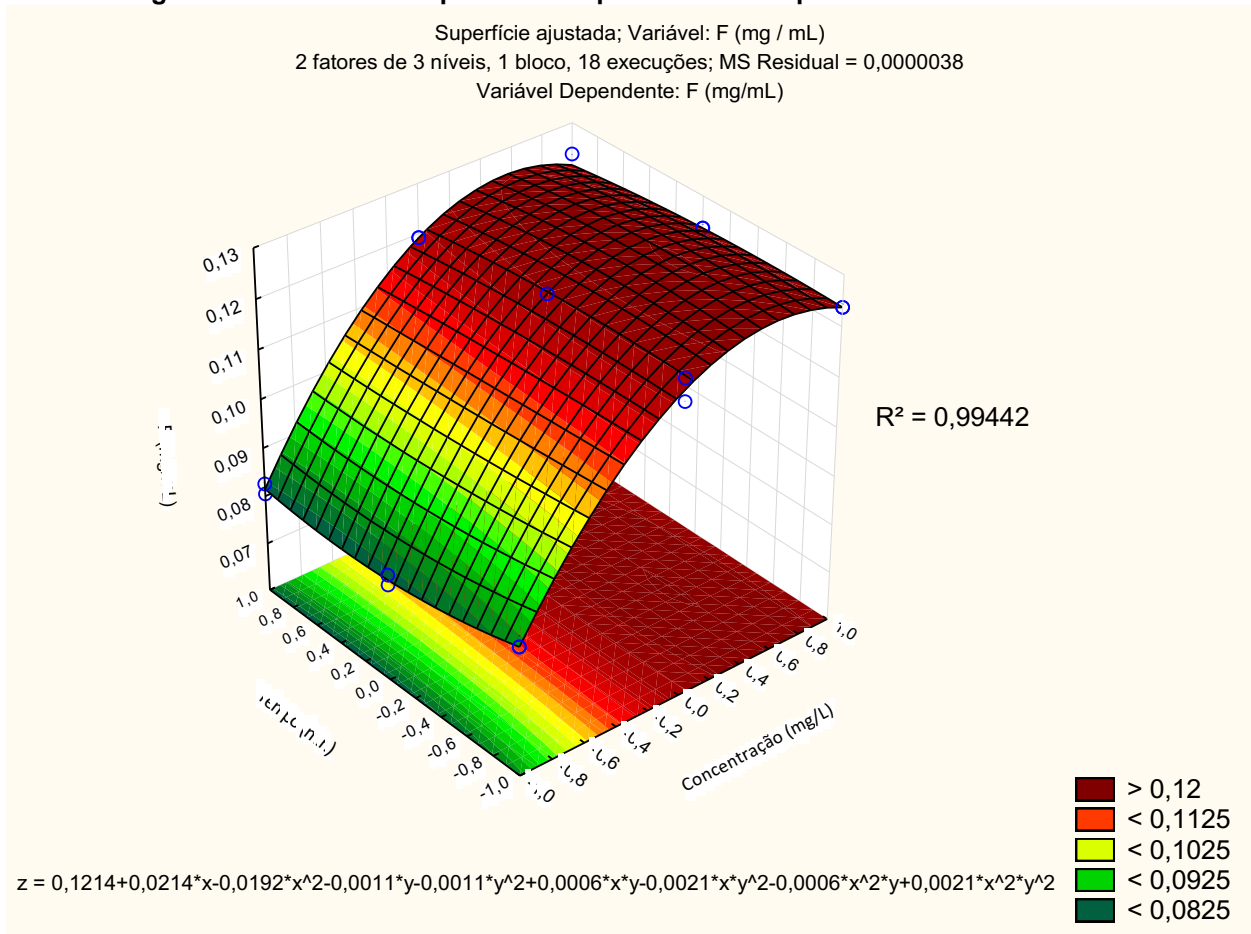
ANOVA; Var.: F (mg/mL); R-sqr=,98999; Adj.: 98108 (Spreadsheet7) 2 3-level factors, 1 Blocks, 18 Runs; MS Residual=,0000073 DV: F (mg/mL)					
Factor	SS	df	MS	F	p
(1)Concentração (mg/L)(L)	0,005073	1	0,005073	696,6831	0,000000
Concentração (mg/L)(Q)	0,001297	1	0,001297	178,1768	0,000000
(2)Tempo (min)(L)	0,000002	1	0,000002	0,2855	0,606095
Tempo (min)(Q)	0,000001	1	0,000001	0,1649	0,694150
1L by 2L	0,000024	1	0,000024	3,3534	0,100298
1L by 2Q	0,000032	1	0,000032	4,3912	0,065594
1Q by 2L	0,000043	1	0,000043	5,8381	0,038850
1Q by 2Q	0,000006	1	0,000006	0,7916	0,396770
Error	0,000066	9	0,000007		
<b>Total SS</b>	<b>0,006543</b>	<b>17</b>			

Fonte: Autoria própria.

Ainda por meio da STATISTICA, originou-se o gráfico que demonstra como foi o comportamento da remoção da furosemida a 5 Volts e 11 Volts, em relação aos parâmetros independentes, representado pelas Figuras 26 e 27.

A Figura 26 apresenta o gráfico de superfície de resposta dos tratamentos para a remoção da furosemida na tensão de 11 Volts. Nos eixos das variáveis independentes tempo e concentração, os valores estão codificados em (-1,0,1). No eixo Z está a variável resposta, indicando a concentração (mg/mL) de furosemida remanescente ou não removida nas soluções tratadas dos ensaios.

**Figura 26 - Gráfico de superfície comportamental do processo de EC a 11 Volts.**



Fonte: Autoria própria.

O intervalo empregado para o tempo de EC na Figura 26 varia em (-1;0;1), assim como demonstrado no planejamento, e o mesmo se aplica ao parâmetro de concentração em (-1;0;1). Representada pelo eixo Z, a concentração de furosemida removida (F) tende a aumentar de acordo com a concentração da amostra bruta (C), no eixo x. Ainda, a remoção é levemente mais eficiente conforme o tempo de eletrocoagulação (T), no eixo y, é aumentado.

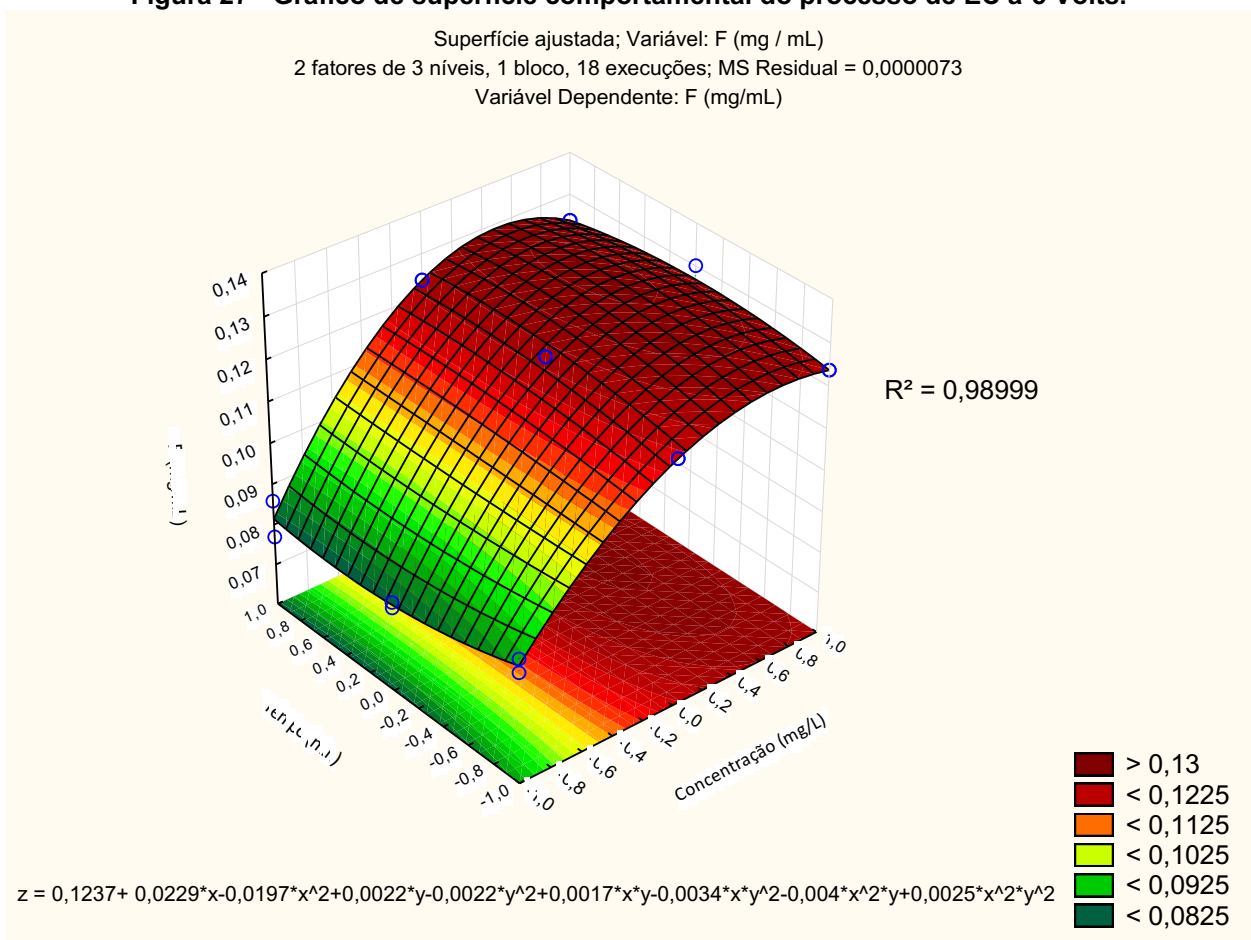
Para descobrir um valor específico da concentração de furosemida remanescente (mg/mL), é possível utilizar a Equação 7, gerada pelo software e como mostra a Figura 21.

$$F = 0,1214 + 0,0214 \times C - 0,0192 \times C^2 - 0,0011 \times T - 0,0011 \times T^2 + 0,0006 \times C \times T - 0,0021 \times C \times T^2 - 0,0006 \times C^2 \times T + 0,0021 \times C^2 \times T^2$$

O coeficiente de determinação da Equação 7 obtido foi de  $R^2 = 0,99442$ . Ele pode variar de 0 a 1, sendo que quanto mais próximo do valor 1, mais preciso é o modelo matemático, ou seja, o modelo matemático obtido representa muito bem os dados experimentais.

A Figura 27 apresenta o gráfico de superfície de resposta dos ensaios submetidos à tensão de 5 Volts.

**Figura 27 - Gráfico de superfície comportamental do processo de EC a 5 Volts.**



Fonte: Autoria própria.

Como esperado, na Figura 27 o gráfico de superfície do processo de eletrocoagulação à 5 Volts foi semelhante ao processo envolvendo uma tensão maior, de 11 Volts. Contudo, o coeficiente de determinação mostrou levemente um melhor resultado, sendo de  $R^2 = 0,98999$ .

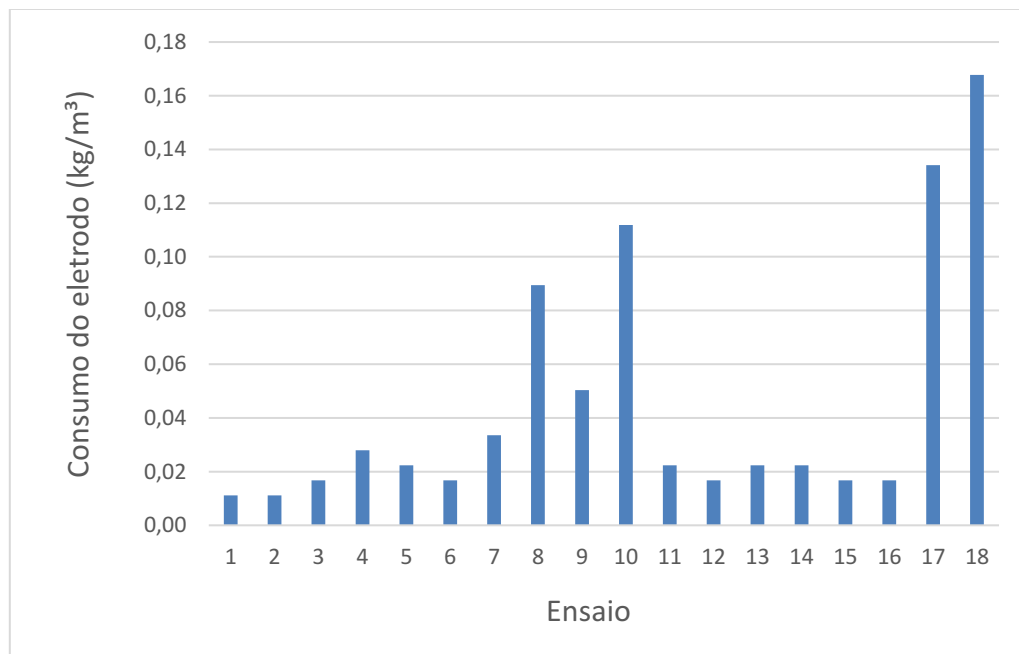
Dessa forma, foi gerado a Equação 8 a partir do gráfico de superfície:

$$F = 0,1237 + 0,0229 \times C - 0,0197 \times C^2 + 0,0022 \times T - 0,0022 \times T^2 + 0,0017 \times C \times T - 0,0034 \times C \times T^2 - 0,004 \times C^2 \times F + 0,0025 \times C^2 \times T^2$$

### 5.3 Consumo do eletrodo

O consumo do eletrodo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) foi calculado a partir da Equação 2 (item 4.9), e a Figura 28 apresenta os dados obtidos para os ensaios submetidos à remoção de furosemeida na tensão de 11 Volts.

**Figura 28 - Consumo do eletrodo dos ensaios submetidos à 11 Volts.**

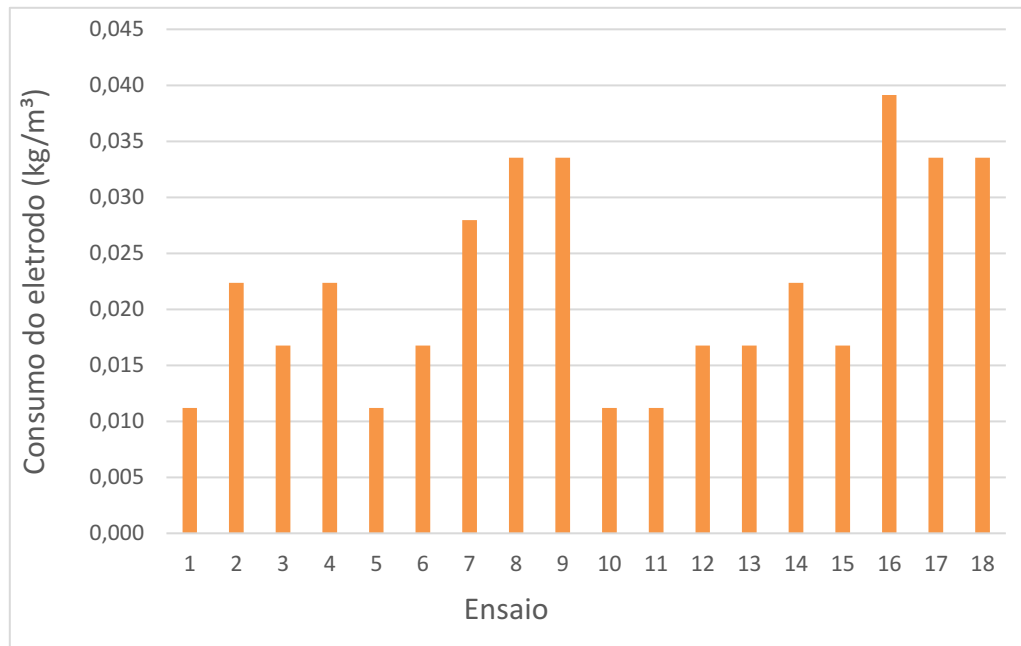


Fonte: Autoria própria.

O maior consumo do eletrodo foi atingido pelo ensaio 18, chegando à  $0,168 \text{ kg}/\text{m}^3$ . Segundo o planejamento experimental, esse ensaio possui o tempo de eletrocoagulação de 30 minutos.

Em seguida, é apresentado a Figura 29, onde pode-se observar o consumo do eletrodo dos ensaios submetidos à 5 Volts.



**Figura 29 - Consumo do eletrodo dos ensaios submetidos à 5 Volts.**

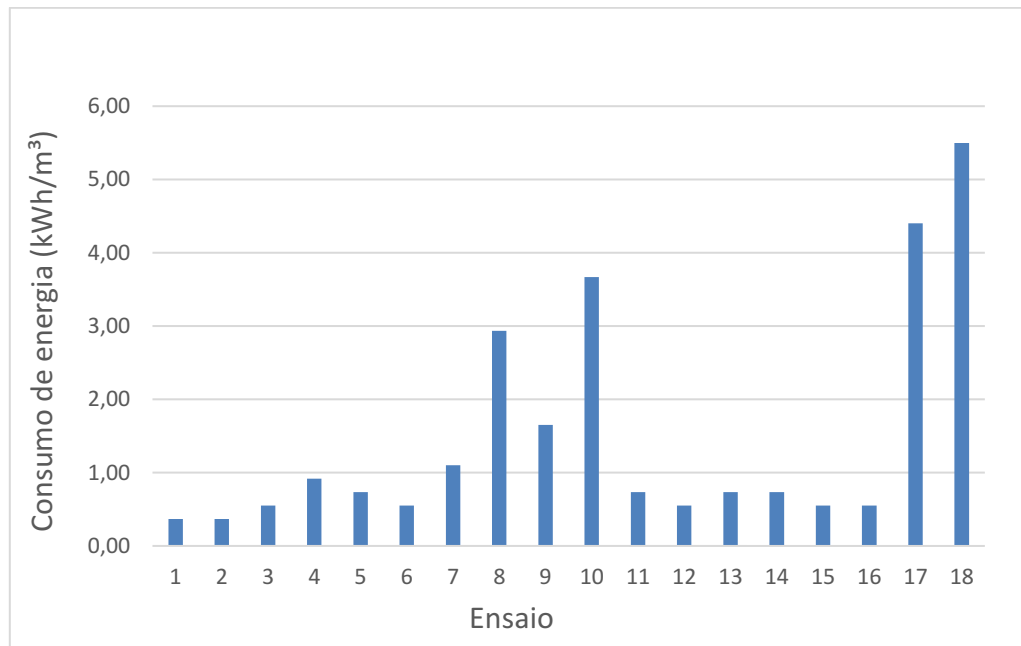
**Fonte: Autoria própria.**

Como é possível observar, o ensaio 16 foi o que apresentou maior desgaste do eletrodo para aqueles submetidos à 5 Volts, chegando à  $0,039 \text{ kg/m}^3$  em um tempo de 10 minutos de processo de eletrocoagulação. Como o esperado, a média dos ensaios submetidos à 11 Volts atingiram uma média de desgaste do eletrodo superior pelo fato de aplicarem uma tensão maior no sistema.

#### **5.4 Consumo de energia elétrica**

Utilizando a Equação 3 do item 4.10, foi possível determinar o consumo de energia elétrica ( $\text{kWh/m}^3$ ) para os ensaios submetidos à 11 Volts, representado pela Figura 30.

**Figura 30 - Consumo de energia elétrica dos ensaios submetidos à 11 Volts.**

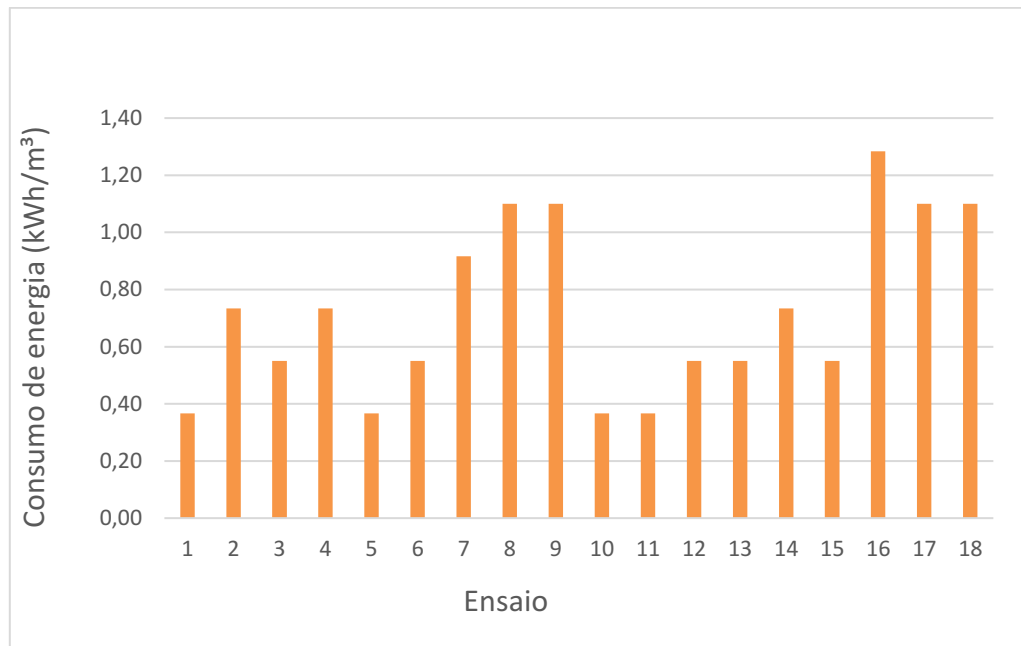


**Fonte: Autoria própria.**

Em conformidade com a Figura 28 que demonstra o desgaste do eletrodo à 11 Volts, o gráfico do consumo de energia elétrica presente na Figura 30 indicou que o ensaio de maior demanda elétrica também foi o 18, com um valor de 5,5 kWh/m<sup>3</sup>. Essa correlação faz muito sentido, uma vez que um maior desgaste do eletrodo foi consequência de uma maior quantidade de energia dentro do sistema.

Da mesma forma, chegou-se ao consumo de energia elétrica disposto para os ensaios submetidos à remoção de furosemida na tensão de 5 Volts, disposta na Figura 31.

**Figura 31 - Consumo de energia elétrica dos ensaios submetidos à 5 Volts.**

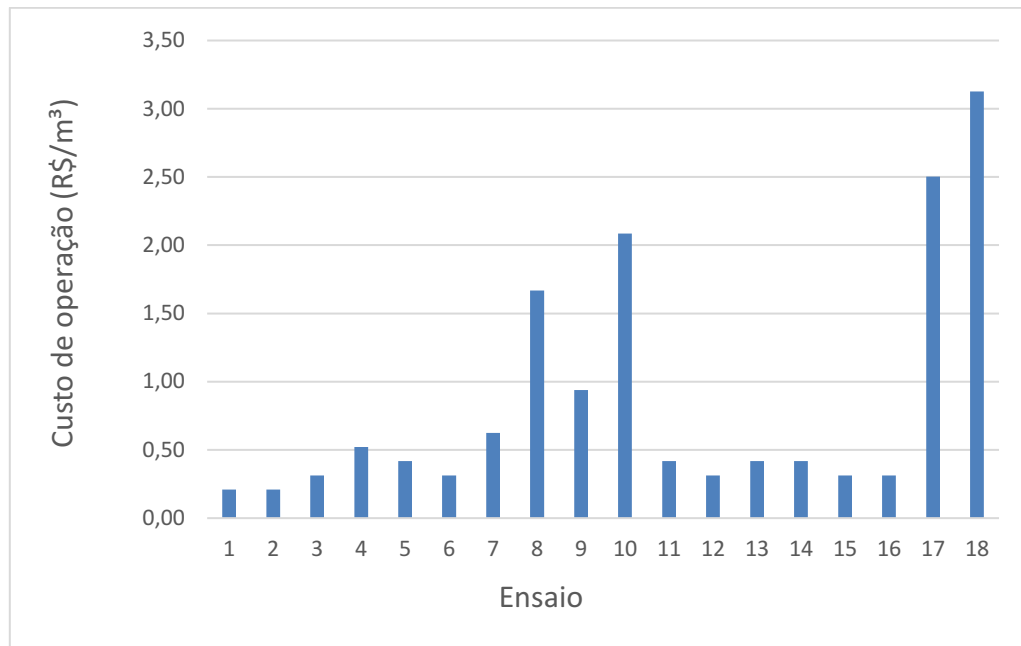


**Fonte: Autoria própria.**

Como pode ser observado na Figura 31, o ensaio 16 foi o que mais obteve consumo de energia, atingindo um valor de  $1,28 \text{ kWh/m}^3$  e mantendo a correlação com o gráfico da Figura 29, sobre o desgaste do eletrodo.

### **5.5 Custo de operação**

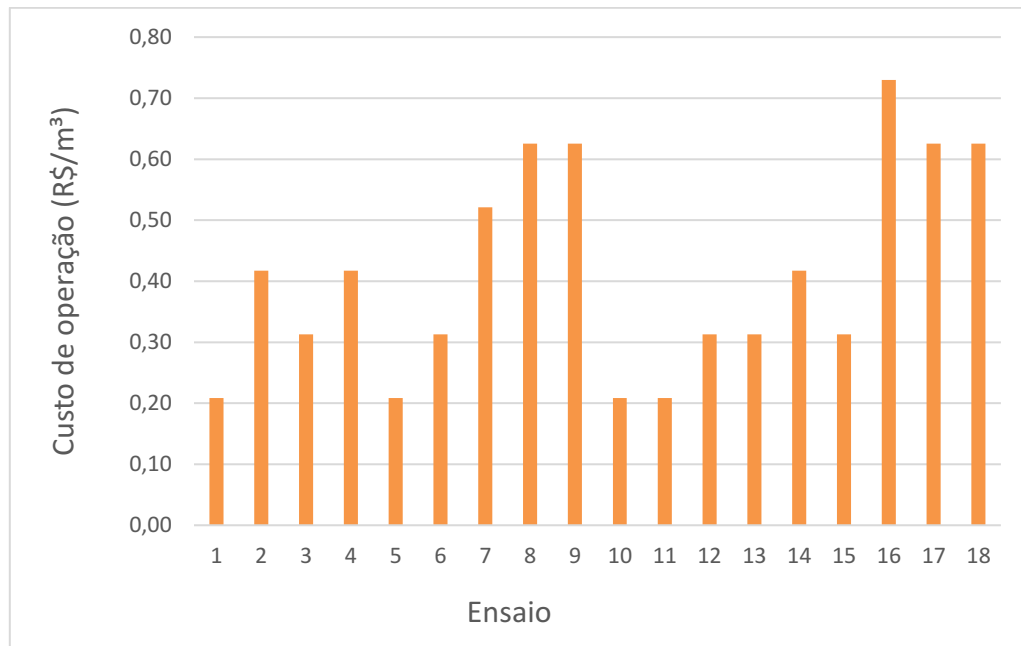
Utilizando a Equação 5 chegou-se à Figura 32, o qual evidencia os custos operacionais do processo submetidos à 11 Volts.

**Figura 32 - Custo de operação dos ensaios submetidos à 11 Volts.**

**Fonte: Autoria própria.**

Ainda em um comportamento de correlação entre a Figura 28 e a Figura 30, o custo de operação foi maior para o ensaio 18, chegando à 3,13 R\$/m<sup>3</sup>.

Pela mesma Equação 5, também foi gerado o gráfico presente na Figura 33, que demonstra o custo de operação dos ensaios submetidos à tensão de 5 Volts.

**Figura 33 - Custo de operação dos ensaios submetidos à 5 Volts.**

**Fonte: Autoria própria.**

Para a tensão de 5 Volts, o ensaio 16 foi superior aos outros, atingindo 0,73 R\$/m<sup>3</sup>. É importante observar que o ensaio 16 foi submetido somente a 10 minutos de processo, contudo, apresentou maior custo operacional dentre àqueles submetidos à 5 Volts. Isso pode estar relacionado à corrente (A) medida durante o processo, que interfere nos resultados dos cálculos de consumo de energia da Equação 5, e que consequentemente foi usado na Equação 6 de custo operacional. No caso, o ensaio 16 foi o que apresentou maior corrente (A), com um valor de 0,7 A.

## 6 CONCLUSÃO

Pode-se concluir após o uso do método de eletrocoagulação utilizando quatro eletrodos de alumínio, que os parâmetros de concentração inicial de furosemida da amostra e o tempo de processo são variáveis importantes que interferem na remoção do contaminante emergente. Dessa forma, o maior percentual geral de remoção ocorreu no ensaio 18, submetido a um tempo de 30 minutos de eletrocoagulação com concentração inicial de 0,3 mg/mL de furosemida. Pode-se dizer que no geral, não houve diferença significativa entre a remoção nas duas tensões (5 e 11 Volts). Para beirar a totalidade de remoção do fármaco furosemida, seria necessário que a amostra fosse submetida a outros métodos de remoção de contaminantes.

Quanto ao custo operacional, os experimentos submetidos à tensão de 5 Volts demonstraram maior custo benefício no estudo, uma vez que obtiveram menor custo para atingir uma eficiência de remoção equilibrada com àqueles submetidos à 11 Volts. O ensaio 18 (11 Volts) foi o que atingiu maior custo, no valor de 3,13 R\$/m<sup>3</sup>. Enquanto isso, o ensaio 16 foi o que apresentou maior custo em 5 Volts, atingindo um valor de 0,73 R\$/m<sup>3</sup>.

Também é importante ressaltar que o maior desgaste do eletrodo aconteceu no ensaio 18 (30 minutos à 11 Volts), atingindo 0,168 kg/m<sup>3</sup>. Além dos gastos com a energia elétrica, quanto maior o desgaste do eletrodo mais alumínio será consumido durante o processo, ou seja, é outro fator a ser levado em conta no controle de gastos na eletrocoagulação.

Recomenda-se para estudos posteriores que outro processo funcione em conjunto com a EC, como por exemplo a adição de uma filtração em cada ensaio após a eletrocoagulação, o que pode aumentar a eficiência de remoção da furosemida.

## REFERÊNCIAS

ABREU, F. G.; BRANDÃO, J; L; B. Impactos e desafios futuros no monitoramento dos contaminantes emergentes. **Anais [...]** Bento Gonçalves, RS: [s.n.], 2013. Disponível em: <<https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=155&SUMARIO=3906>>. Acesso em: 25 jul. de 2021.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Quantidade de água**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/aguas-no-brasil/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>>. Acesso em: 20 jul. 2021.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Usos da Água e Abastecimento**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/aguas-no-brasil/usos-da-agua/abastecimento>>. Acesso em: 20 jul. 2021.

ASSOCIAÇÃO MINEIRA DE MUNICÍPIOS. **Pesquisa do IBGE analisa situação do saneamento básico no Brasil**. 2020. Disponível em:<<https://portalamm.org.br/pesquisa-do-ibge-analisa-situacao-do-saneamento-basico-no-brasil/>>. Acesso em: 20 jul. 2021.

AOAC. 1995. Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis. 16.ed. v.2. Arlington: AOAC. 474p.

BEHLING, L. **Aplicação do processo de eletrocoagulação – Peroxidação (ECP) no tratamento de fármacos em efluente sintético**. Orientadora: Gean Delise Vargas. 2021. 40f. Universidade Federal da Fronteira Sul, Erechim, 2021. Disponível em: <<https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/5241/1/BEHLING.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2022.

BENSADOK, K.; BENAMMAR, S.; LAPICQUE, F.; NEZZAL, G. Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes. **Journal of Hazardous Materials**, v.152, n.1, p. 423-430, junho. 2007.

BILA, D. M.; DEZZOTI, M. Desreguladores endócrinos no meio ambiente: efeitos e consequências. **Química Nova**, Rio de Janeiro, vol. 30, n.3, p. 651-666. 2007.

Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/publication/244750817\\_Desreguladores\\_endocricos\\_no\\_meio\\_ambiente\\_efeitos\\_e\\_consequencias](https://www.researchgate.net/publication/244750817_Desreguladores_endocricos_no_meio_ambiente_efeitos_e_consequencias)>. Acesso em: 8 de ago. de 2021.

BRÄCHER, G. H. **Análise do desempenho de um sistema de eletrocoagulação-flotação para o tratamento de esgoto doméstico visando reuso**. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade de Santa Maria, p.128. 2018.

BRASIL. Portaria nº 888, de 4 de maio de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Ministério da Saúde**. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>>. Acesso em: 24 agosto de 2021.

CARDOSO, C. **Estudos de equilíbrio de adsorção de cinco contaminantes emergentes utilizando quitosana, quitosana modificada com vanilina e sabugo de milho**. Tese (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 74. 2019.

CHEN, GUOHUA, “Electrochemical technologies in wastewater treatment”. **Separation and purification Technology**, v. 38, n. 1, p. 11-41, 2004.

### **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO**

**CIENTÍFICA**, 2015, Campinas. Tratamento de Efluente do Fármaco Ciprofloxacina em Reator de Eletrocoagulação Utilizando Eletrodos de Alumínio. Campinas, 2015. p. 6

CONTAMINANTES OF EMERGING CONCERN IN THE ENVIRONMENT. **United States Geological Survey**, 16 de jun. de 2017. Disponível em:



<<https://toxics.usgs.gov/investigations/cec/index.php>>. Acesso em 25 de jul. de 2021.

Copel Paranaense de Energia - **COPEL**. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcweb/copel-distribuicao/taxas-tarifas/?menu4>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

FONTENELE, E. G. P.; MARTINS, M. R. A.; QUIDUTE, A. R. P.; MONTENEGRO JÚNIOR, R. M. Contaminantes ambientais e os interferentes endócrinos. **Arquivos Brasileiros de Endocrinologia & Metabologia**, São Paulo, v. 54, n. 1, fev. 2010.

HENRIQUES, D. M. **Degradação de Nonilfenol Polietoxilado e de Efluente Têxtil por Meio de Eletrocoagulação e Processos Fenton**. Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, 2004.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Principais estatísticas de água no Brasil**. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/agua>>. Acesso em: 20 jul. 2021.

KALLET, R. H. The role of inhaled opioids and furosemide for the treatment of dyspnea. **Respiratory Care**, v.52, n7, p. 900-910, jul. 2007.

KITAMURA, S. S.; ORTOLANI, E. L. Estudo de diferentes doses de furosemida sobre a função renal de bovinos hípidos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.5, p. 1349-1354, set-out 2007.

KOERICH, P. **CONTAMINANTES EMERGENTES NO RIO LONTRA (SALTO DO LONTRA-PR)**. Orientadora: Dr. Liziara da Costa Cabrera. TCC (Graduação) – Licenciatura em Química, Universidade Federal da Fronteira Sul, Realeza, 2015. Disponível em: <<https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/233/1/KOERICH.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2022.

LUO, YUNLONG et al. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic

environment and their fate and removal during wastewater treatment. **Science of the Total Environment**, v. 473, p. 619-641, 2014.

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 of Hazardous Materials B114**, p. 199-210, 2004.

MONTAGNER, C. C.; VIDAL, C.; ACAYABA, R. D. Contaminantes Emergentes em Matrices Aquáticas do Brasil: Cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. **Revista Científica Química Nova**, v. 40, n. 9, p. 1094-1110, 2017.

Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/qn/a/NJr4QLWkxCkJXd6gHvdwtNk/?format=pdf&lang=pt>>.

Acesso em: 22 jul. de 2021.

MONTAGNER, C. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. **Química Nova**, v. 40, n9, p. 1094-1110. 2017. Disponível em:

<<https://www.scielo.br/j/qn/a/NJr4QLWkxCkJXd6gHvdwtNk/?lang=pt&format=html>>.

Acesso em 30 de jul. de 2021.

PÉREZ, J. R. M.; CORDOVÍ, L. L. B. Asma bronquial y furosemida. **Revista Electrónica Dr. Zoilo E. Marinello Vidaurreta**, v. 39, n8. Agosto de 2014.

PESCARA, I. C. **Ocorrência e remoção de contaminantes emergentes por tratamentos convencionais de água de esgoto**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química. Campinas, 2014.

RAIMUNDO, C.C.M. **Contaminantes emergentes em água tratada e seus mananciais: sazonalidade, remoção e atividade estrogênica**. 2011.172 f. Tese (Doutorado em Química) - Instituto de Química da UNICAMP. São Paulo, 2011.

REAVES, D. K.; GINSBURG, E.; BANG, J. J.; FLEMING, J. M. "Persistent organic pollutants and obesity: are they potential mechanisms for breast cancer promotion?". **Endocrine-Related Cancer**, v. 22, n2, p. 69-86, abril de 2015.

RICHARDSON S. D.; KIMURA S. Y. Water Analysis: Emerging Contaminants and Current Issues. **Analytical Chemistry**, p. 546-582, 2016.

SAHNI, J.; PHELPS, S. J. Nebulized furosemide in the treatment of bronchopulmonary dysplasia in preterm infants. **The Journal of Pediatric Pharmacology and Therapeutics**. mar. 2011.

SANEPAR. **Manual de projetos de saneamento** (Módulo 10.1). Paraná, ago. 2018, p. 32. Disponível em:

<[https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/informacoes-tecnicas/mps-versao-2018/modulo\\_10.1\\_-\\_diretrizes\\_-\\_projeto\\_de\\_tratamento\\_de\\_agua.pdf](https://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/informacoes-tecnicas/mps-versao-2018/modulo_10.1_-_diretrizes_-_projeto_de_tratamento_de_agua.pdf)>. Acesso em: 25 jul. de 2021.

SPRICIGO, R.; BOTELHO, K.; CONSIGLIERI, V.; SERRA, C. Obtenção e Avaliação de Complexos de Inclusão de Furosemida com  $\beta$ -ciclodextrina e hidroxipropil- $\beta$  ciclodextrina: Efeitos sobre as Propriedades de Dissolução do Fármaco. **Latin American Journal of Pharmacy**. São Paulo, v.27, n.5, p. 645-653. Junho de 2008.

TAKDASTAN, AFSHIN et al. Electrocoagulation Process for Treatment of Detergent and Phosphate. **Archives of Hygiene Sciences**, p. 66-74. 2017. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/330660642\\_Electrocoagulation\\_Process\\_for\\_Treatment\\_of\\_Detergent\\_and\\_Phosphate](https://www.researchgate.net/publication/330660642_Electrocoagulation_Process_for_Treatment_of_Detergent_and_Phosphate)>. Acesso: 28 jul. de 2021.

THE MERCK INDEX. **An encyclopedia of chemicals drugs and biologicals**. Whitehouse Station: Merck, ed 13, p, 1741, 2001.

THEODORO, P. S. **Utilização da eletrocoagulação no tratamento de efluentes da indústria galvânica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo. 2010.

TORDIN, Cristiane. **Contaminantes emergentes podem ser uma ameaça na água para consumo humano**. Embrapa, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/32796742/contaminantes-emergentes-podem-ser-uma-ameaca-na-agua-para-consumo-humano>>. Acesso em: 21 jul. de 2021.

VERLICCHI, P.; AUKIDY, M. A.; ZAMBELLO, E. Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater: removal, mass load and environmental risk after a secondary treatment e a review. **Science of the Total Environment**, v. 429, p. 123-155, 2012.

C. SANTOLIN, F.R. ESPINOZA-QUINONES, A.R.C de SOUZA. **Tratamento de Efluente do Fármaco Ciprofloxacina em Reator de Eletrocoagulação Utilizando Eletrodos de Alumínio**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química e em Iniciação Científica, XI, 2015, Campinas. Disponível em: < [https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Espinoza-Quinones/publication/300148517\\_Tratamento\\_de\\_Efluente\\_do\\_Farmaco\\_Ciprofloxacina\\_em\\_Reator\\_de\\_Eletrocoagulacao\\_Utilizando\\_Eletrodos\\_de\\_Aluminio/links/570ce1f708aec783ddcd9f12/Tratamento-de-Efluente-do-Farmaco-Ciprofloxacina-em-Reator-de-Eletrocoagulacao-Utilizando-Eletrodos-de-Aluminio.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Fernando-Espinoza-Quinones/publication/300148517_Tratamento_de_Efluente_do_Farmaco_Ciprofloxacina_em_Reator_de_Eletrocoagulacao_Utilizando_Eletrodos_de_Aluminio/links/570ce1f708aec783ddcd9f12/Tratamento-de-Efluente-do-Farmaco-Ciprofloxacina-em-Reator-de-Eletrocoagulacao-Utilizando-Eletrodos-de-Aluminio.pdf)>. Acesso em: 25 mar. 2022.

## APÊNDICES

**Apêndice A.1 - Resultados do planejamento fatorial da concentração e tempo para o tratamento da água de estudo pelo processo de eletrocoagulação à 11 Volts**

Planejamento Estatístico			Resposta			
Ensaio	Concentração (mg/mL)	Tempo (min)	Amperagem	pH	Absorvância	Furosemida
					(abs)	removida (mg/mL)
1	0,1	10	0,02	8,33	2,395	0,086
2	0,1	20	0,01	7,7	2,27	0,082
3	0,1	30	0,01	7,65	2,232	0,080
4	0,2	10	0,05	9,17	3,311	0,119
5	0,2	20	0,02	8,59	3,436	0,124
6	0,2	30	0,01	8,34	3,311	0,119
7	0,3	10	0,06	10,5	3,436	0,124
8	0,3	20	0,08	9,48	3,436	0,124
9	0,3	30	0,03	9,2	3,436	0,124
10	0,1	10	0,02	8,19	2,395	0,086
11	0,1	20	0,02	8,03	2,214	0,080
12	0,1	30	0,01	7,73	2,29	0,083
13	0,2	10	0,04	9,23	3,436	0,124
14	0,2	20	0,02	8,63	3,311	0,119
15	0,2	30	0,01	8,39	3,311	0,119
16	0,3	10	0,03	9,65	3,436	0,124
17	0,3	20	0,12	9,46	3,436	0,124
18	0,3	30	0,1	8,98	3,311	0,119

Fonte: Autoria Própria

Ensaio	Tempo (h)	Tempo (min)	Tempo (s)	Cor. Elét. (A)	Mel (g)	Tdesg (h)	Tdesg (min)	Tdesg (seg)	$\delta$ (A/m <sup>2</sup> )
1	0,17	10	600	0,02	0,0011	0,167	10,02	601	1,90
2	0,33	20	1200	0,01	0,0011	0,334	20,03	1202	0,95
3	0,50	30	1800	0,01	0,0017	0,501	30,05	1803	0,95
4	0,17	10	600	0,05	0,0028	0,167	10,02	601	4,76
5	0,33	20	1200	0,02	0,0022	0,334	20,03	1202	1,90
6	0,50	30	1800	0,01	0,0017	0,501	30,05	1803	0,95
7	0,17	10	600	0,06	0,0034	0,167	10,02	601	5,71
8	0,33	20	1200	0,08	0,0089	0,334	20,03	1202	7,62
9	0,50	30	1800	0,03	0,0050	0,501	30,05	1803	2,86
10	0,17	10	600	0,2	0,0112	0,167	10,02	601	19,05
11	0,33	20	1200	0,02	0,0022	0,334	20,03	1202	1,90
12	0,50	30	1800	0,01	0,0017	0,501	30,05	1803	0,95
13	0,17	10	600	0,04	0,0022	0,167	10,02	601	3,81
14	0,33	20	1200	0,02	0,0022	0,334	20,03	1202	1,90
15	0,50	30	1800	0,01	0,0017	0,501	30,05	1803	0,95
16	0,17	10	600	0,03	0,0017	0,167	10,02	601	2,86
17	0,33	20	1200	0,12	0,0134	0,334	20,03	1202	11,43
18	0,50	30	1800	0,1	0,0168	0,501	30,05	1803	9,52

**Apêndice A.2 – Dados obtidos para o cálculo do custo operacional à 11 Volts.  
Fonte: Autoria Própria**

**Apêndice A.3 – Resultados de custo operacional à 11 Volts.**

<b>Ensaio</b>	<b>Consumo energia (KWh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Consumo eletrodo (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Custo de operação (R\$/m<sup>3</sup>)</b>
1	0,367	0,0112	0,209
2	0,367	0,0112	0,209
3	0,550	0,0168	0,313
4	0,917	0,0280	0,521
5	0,733	0,0224	0,417
6	0,550	0,0168	0,313
7	1,100	0,0336	0,626
8	2,933	0,0895	1,668
9	1,650	0,0503	0,938
10	3,667	0,1118	2,085
11	0,733	0,0224	0,417
12	0,550	0,0168	0,313
13	0,733	0,0224	0,417
14	0,733	0,0224	0,417
15	0,550	0,0168	0,313
16	0,550	0,0168	0,313
17	4,400	0,1342	2,502
18	5,500	0,1678	3,128

**Fonte: Aatoria Própria**

**Apêndice B.1 - Resultados do planejamento fatorial da concentração e tempo para o tratamento da água de estudo pelo processo de eletrocoagulação à 5 Volts.**

Planejamento Estatístico			Resposta			
Ensaio	Concentração (mg/mL)	Tempo (min)	Amperagem	pH	Absorvância	Furosemida
					(abs)	removida (mg/mL)
1	0,1	10	0,02	8,3	2,498	0,090
2	0,1	20	0,02	7,72	2,232	0,080
3	0,1	30	0,01	7,5	2,135	0,077
4	0,2	10	0,04	8,89	3,311	0,119
5	0,2	20	0,01	8,52	3,436	0,124
6	0,2	30	0,01	8,3	3,436	0,124
7	0,3	10	0,05	9,86	3,436	0,124
8	0,3	20	0,03	9,04	3,436	0,124
9	0,3	30	0,02	8,74	3,436	0,124
10	0,1	10	0,02	8,16	2,408	0,087
11	0,1	20	0,01	7,8	2,27	0,082
12	0,1	30	0,01	7,67	2,382	0,086
13	0,2	10	0,03	8,9	3,311	0,119
14	0,2	20	0,02	8,25	3,436	0,124
15	0,2	30	0,01	8,58	3,436	0,124
16	0,3	10	0,07	9,83	3,436	0,124
17	0,3	20	0,03	8,94	3,612	0,130
18	0,3	30	0,02	8,82	3,436	0,124

Fonte: Autoria própria.



Apêndice B.2 - Dados obtidos para o cálculo do custo operacional à 5 Volts.

Ensaio	Tempo (h)	Tempo (min)	Tempo (s)	Cor. Elét. (A)	Mel (g)	Tdesg (h)	Tdesg (min)	Tdesg (seg)	$\delta$ (A/m <sup>2</sup> )
1	0,17	10	600	0,02	0,0011	0,167	10,02	601	1,90
2	0,33	20	1200	0,02	0,0022	0,334	20,03	1202	1,90
3	0,50	30	1800	0,01	0,0017	0,501	30,05	1803	0,95
4	0,17	10	600	0,04	0,0022	0,167	10,02	601	3,81
5	0,33	20	1200	0,01	0,0011	0,334	20,03	1202	0,95
6	0,50	30	1800	0,01	0,0017	0,501	30,05	1803	0,95
7	0,17	10	600	0,05	0,0028	0,167	10,02	601	4,76
8	0,33	20	1200	0,03	0,0034	0,334	20,03	1202	2,86
9	0,50	30	1800	0,02	0,0034	0,501	30,05	1803	1,90
10	0,17	10	600	0,02	0,0011	0,167	10,02	601	1,90
11	0,33	20	1200	0,01	0,0011	0,334	20,03	1202	0,95
12	0,50	30	1800	0,01	0,0017	0,501	30,05	1803	0,95
13	0,17	10	600	0,03	0,0017	0,167	10,02	601	2,86
14	0,33	20	1200	0,02	0,0022	0,334	20,03	1202	1,90
15	0,50	30	1800	0,01	0,0017	0,501	30,05	1803	0,95
16	0,17	10	600	0,07	0,0039	0,167	10,02	601	6,67
17	0,33	20	1200	0,03	0,0034	0,334	20,03	1202	2,86
18	0,50	30	1800	0,02	0,0034	0,501	30,05	1803	1,90

Fonte: Autoria própria.

**Apêndice B.3 – Resultados de custo operacional à 5 Volts.**

<b>Ensaio</b>	<b>Consumo E (KWh/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Consumo eletrodo (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Custo de operação (R\$/m<sup>3</sup>)</b>
1	0,367	0,0112	0,209
2	0,733	0,0224	0,417
3	0,550	0,0168	0,313
4	0,733	0,0224	0,417
5	0,367	0,0112	0,209
6	0,550	0,0168	0,313
7	0,917	0,0280	0,521
8	1,100	0,0336	0,626
9	1,100	0,0336	0,626
10	0,367	0,0112	0,209
11	0,367	0,0112	0,209
12	0,550	0,0168	0,313
13	0,550	0,0168	0,313
14	0,733	0,0224	0,417
15	0,550	0,0168	0,313
16	1,283	0,0391	0,730
17	1,100	0,0336	0,626
18	1,100	0,0336	0,626

**Fonte: Autoria própria.**

**Apêndice C – Tabela de eficiência de remoção da furosemida em porcentagem**

<b>Ensaio</b>	<b>Remoção (%) 11 V</b>	<b>Remoção (%) 5 V</b>
1	13,696	9,995
2	18,187	19,552
3	19,552	23,037
4	40,393	40,393
5	38,147	38,147
6	40,393	38,147
7	58,765	58,765
8	58,765	58,765
9	58,765	58,765
10	13,696	13,229
11	20,199	18,187
12	17,468	14,163
13	38,147	40,393
14	40,393	38,147
15	40,393	38,147
16	58,765	58,765
17	58,765	56,657
18	60,262	58,765

**Fonte: Autoria própria.**

**Apêndice D.1 – Dados do alumínio utilizado no estudo.**

<b>Alumínio</b>	
M (g/mol)	26,98
n	3
$\alpha$ (g/Ah)	0,335
Custo (R\$/kg)	13,67

**Fonte: Autoria própria.**

**Apêndice D.2 – Dados do eletrodo utilizado no estudo.**

<b>Eletrodo</b>	
Número (unid)	4
Peso (g)	83,19
Área anodo (m <sup>2</sup> )	0,0105
Custo (R\$/0,2Kg)	4,548829

**Fonte: Autoria própria.**

**Apêndice D.3 – Volume utilizado em cada ensaio.**

<b>Água tratada</b>	
V (m <sup>3</sup> )	0,0001

**Fonte: Autoria própria.**

**Apêndice D.4 – Custo de energia no período de realização dos experimentos.**

<b>Energia</b>	
Custo (R\$/KWh)	0,42991

**Fonte: Autoria própria.**

**Apêndice D.5 – Constantes utilizadas para os cálculos de custo operacional.**

<b>Constantes</b>	
F (C/mol)	96500
U (V)	11

**Fonte: Autoria própria.**