

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

CAIO NOBORU MOTOMATSU FERRAREZE

**TRATAMENTO DE ÁGUA ATRAVÉS DO PROCESSO DE  
ELETROCOAGULAÇÃO ASSOCIADO AO USO DE COAGULANTES  
ORGÂNICOS E INORGÂNICOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**LONDRINA**  
**2016**

**CAIO NOBORU MOTOMATSU FERRAREZE**

**TRATAMENTO DE ÁGUA ATRAVÉS DO PROCESSO DE  
ELETROCOAGULAÇÃO ASSOCIADO AO USO DE COAGULANTES  
ORGÂNICOS E INORGÂNICOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientadora: Profa. Dra. Joseane Debora Peruço Theodoro

Co-orientadora: Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira

**LONDRINA**

**2016**



**Ministério da Educação**  
**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
Campus Londrina  
Coordenação de Engenharia Ambiental



## TERMO DE APROVAÇÃO

Tratamento de Água Através do Processo de Eletrocoagulação  
por

Caio Noboru Motomatsu Ferrareze

Monografia apresentada no dia 15 de junho de 2016 ao Curso Superior 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, a Banca Examinadora considerou o trabalho \_\_\_\_\_ (aprovado, aprovado com restrições ou reprovado).

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Ajadir Fazolo  
(UTFPR)

\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira  
(UTFPR)

\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Joseane Débora Peruço Theodoro  
(UTFPR)  
Orientadora

\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista

Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

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

## **AGRADECIMENTOS**

São muitos, diria incontáveis, aqueles que são dignos ao menos de minha gratidão ao decorrer deste importante período em minha vida, que parcialmente se encerra com este trabalho de conclusão de curso. Assim, muitos não poderão ser citados aqui, não por falta de lembrança ou afeto, mas somente pelo fato de que para cita-los, 100 páginas por extenso seriam mediocrementemente insuficientes.

Desta forma, começo agradecendo a Deus, pelo simples fato de existir e também pela existência de tantas coisas e pessoas a quem devo ser grato.

Agradeço a minha família, minha base e refúgio, por todo o apoio, amor e confiança, que um dia eu possa retribuir um milésimo de tudo que fazem por mim.

Agradeço minha namorada, Bruna, pelo amor e pela paciência, pelas ligações adiantadas ou atrasadas, pelos feriados perdidos, e pelo fato de me mostrar que mesmo estando longe posso sempre contar com seu apoio e carinho.

Sou também, grato aos meus amigos, que moram próximos ou distantes, pelo companheirismo e alegrias, que fazem com que as dificuldades e aflições do dia a dia sejam vencidas mais facilmente. Dentre estes, gostaria de lembrar especificamente de meu amigo Vinicius Iwamura, com quem compartilhei grandes momentos durante a graduação, inclusive nas etapas de sua conclusão.

Agradeço as minhas orientadora e co-orientadora Profa. Dra. Joseane Débora Peruço Theodoro e Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira pela confiança, conhecimento e amizade.

Agradeço ao Msc. Paulo Sergio Theodoro e a aluna Thais Ribeiro, por toda a disponibilidade e ajuda direta na execução deste trabalho.

Por fim, agradeço por todo o aprendizado e oportunidades, a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, a qual espero um dia ter o orgulho de representar no mercado de trabalho como Engenheiro Ambiental.

## RESUMO

FERRAREZE, Caio N. M. Tratamento de água através do processo de eletrocoagulação. 107 f. 2016. TCC (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2016.

A disponibilidade de água potável para consumo humano é uma das grandes preocupações das gerações atuais. Métodos alternativos e mais eficientes para o tratamento de água são algumas das opções para aumentar o acesso da população a uma água de qualidade. O objetivo deste trabalho foi realizar a aplicação do processo de eletrocoagulação para o tratamento de água, comparando a eficiência dos resultados com a adição de coagulante orgânico (Tanfloc SG) e inorgânico (cloreto férrico). A realização do trabalho foi feita através de 20 ensaios (de acordo com planejamento experimental fatorial pré-definido); em 4 ensaios foram realizados o processo eletrocoagulação sem adição de coagulante. Nos outros 16 ensaios, 8 foram destinados para eletrocoagulação com adição de coagulante inorgânico e 8 para a eletrocoagulação com adição de coagulante orgânico. Os ensaios foram realizados utilizando um reator em nível de bancada composto por um recipiente de acrílico de 2 L de volume, um agitador magnético, uma fonte de corrente elétrica e um sistema de eletrodos monopolares disposto por meio de 4 placas de ferro conectadas de forma equidistantes em paralelo. Os parâmetros cor aparente, turbidez e pH, foram analisados de acordo com o processo utilizado e com as variáveis concentração, corrente elétrica e tempo de reação. Quando feita a adição de coagulantes inorgânico e orgânico, suas concentrações variaram entre 25 e 50 mg.L<sup>-1</sup>. As correntes elétricas utilizadas foram de 0,2 e 0,5 A, essa alteração, quando desejada, foi obtida graças a adição de 250 mg.L<sup>-1</sup> de sal a amostra. Os tempos dos ensaios foram de 40 e 80 minutos, sendo que nos ensaios de maior tempo, foram realizadas medições dos parâmetros cor aparente e turbidez a cada 5 minutos, para análise da remoção destes parâmetros de acordo com o tempo e para a realização do estudo do comportamento cinético da concentração do parâmetro turbidez. Dentre todos os ensaios de eletrocoagulação realizados (com e sem o uso de agentes coagulantes), o ensaio 7, no qual foram utilizados 25 mg.L<sup>-1</sup> de cloreto férrico, 0,5 A de corrente elétrica e 40 minutos de processo; foi o que mais se destacou, resultando uma cor aparente de 270 uH (70,33% de remoção), turbidez de 12,4 uT (96,77% de remoção) e pH de 9,2. Para os valores obtidos em relação ao tempo o melhor resultado para o parâmetro cor aparente foi de 161 uH (82,31% de remoção) aos 5 minutos do processo utilizando 25 mg.L<sup>-1</sup> do coagulante orgânico e 0,2 A de corrente elétrica. O melhor resultado para o parâmetro turbidez foi de 8,9 uT (97,68% de remoção) aos 50 minutos do processo utilizando 25 mg.L<sup>-1</sup> do coagulante inorgânico e 0,5 A de corrente elétrica. Conclui-se que no geral, o melhor resultado levando em conta a remoção dos parâmetros cor aparente e turbidez, foi alcançado aos 25 minutos do processo utilizando 25 mg.L<sup>-1</sup> do coagulante inorgânico e 0,5 A de corrente elétrica, onde foram obtidos valores de 170 uH (81,32% de remoção) para o parâmetro cor aparente e 13,5 uT (96,48% de remoção) para o parâmetro turbidez.

Palavras-chave: Tratamento de água, eletrocoagulação, coagulante orgânico, coagulante inorgânico.

## ABSTRACT

Ferrareze, Caio N. M. Water treatment by electrocoagulation process. 107 p. 2016. TCC (Graduation in Environmental Engineering), Technological Federal University of Paraná. Londrina, 2016.

The availability of drinking water for human consumption is a major concern of current generations. Alternative methods and more efficiency for water treatment are some of the options to increase the population's access to quality water. The aim of this study was the application of electrocoagulation process for water treatment, comparing the efficiency of the process by itself, the process with the addition of organic coagulant (Tanfloc SG) and inorganic coagulant (ferric chloride). The execution of this work was done through 20 tests (according to pre-defined experimental design); in 4 cases the electrocoagulation process were done without adding coagulant. In the others 16, 8 were used for electrocoagulation with addition of inorganic coagulant and 8 for electrocoagulation with addition of organic coagulant. The tests were performed using a bench level reactor composed by an acrylic container of 2 L in volume, a magnetic stirrer, a source of electrical current, and a monopolar electrode system arranged by four iron plates connected in equidistant way in parallel. The parameters apparent color, turbidity and pH were analyzed according to the used process and the variables: concentration, electrical current and time of reaction. The concentrations used for inorganic and organic coagulants were 25 and 50 mg.L<sup>-1</sup> dosed via 1g.L<sup>-1</sup> solutions. The electric current ranged between 0,2 and 0,5 A, this variation was obtained through to the addition of 250 mg.L<sup>-1</sup> of salt in the sample. The time of the tests ranged between 40 and 80 minutes. In the longer tests, measurements of the apparent color and turbidity were made in every 5 minutes for the analysis of removal of these parameters according to the time and to study the kinetic behavior of the concentration of the parameter turbidity. Among all electrocoagulation tests (using coagulating agents or not), the test 7, which were used 25 mg.L<sup>-1</sup> of ferric chloride, 0,5 A of electrical current, and process time of 40 minute; was the one that stood out, resulting in an apparent color of 270 uH (70.33% removal), a turbidity of 12.4 NTU (96.77% removal) and pH of 9,2. The best values obtained according to time for the parameter apparent color was 161 uH (82.31% removal) after 5 minutes of the process using 25 mg.L<sup>-1</sup> of the organic coagulant and 0,2 A of electric current. The best result for the parameter turbidity was 8.9 NTU (97.68% removal) after 50 minutes of the procedure using 25 mg.L<sup>-1</sup> of the inorganic coagulant and 0,5 A of electrical current. The best results, considering the removal of both parameters was achieved after 25 minutes of the process using 25 mg.L<sup>-1</sup> of the inorganic coagulant and 0,5 A of electrical current, the obtained values of 170 uH (81.32% removal) to the apparent color and 13,5 NTU (96.48% removal) to the turbidity parameter.

Keywords: Water treatment, electrocoagulation, organic coagulant, inorganic coagulant.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa com a localização da SAMAE Ibiporã. ....	28
Figura 2: Reator de eletrocoagulação em nível de bancada. Sendo que: A) sistema de eletrodos monopolares; B) recipiente utilizado no reator; C) fonte de corrente elétrica; D) agitador eletromagnético. ....	30
Figura 3: Esquema do sistema de eletrodos monopolares do reator. ....	31
Figura 4: Solução coagulante de cloreto férrico. ....	32
Figura 5: Coleta realizada na chegada da água bruta na ETA da SAMAE Ibiporã. <b>.Error! Bookmark not defined.</b>	
Figura 6: Aspecto da água no dia da coleta. ....	38
Figura 7: Remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez através da eletrocoagulação sem adição de coagulantes de acordo com os ensaios realizados....	39
Figura 8: Remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez através da eletrocoagulação com adição de cloreto férrico de acordo com os ensaios realizados. ....	40
Figura 9: Remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez através da eletrocoagulação com adição de Tanfloc SG de acordo com os ensaios realizados. ....	41
Figura 10: Remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez através da eletrocoagulação de acordo com os ensaios realizados. ....	43
Figura 11: Remoção do parâmetro cor aparente através da eletrocoagulação sem adição de coagulantes com corrente elétrica de 0,2 A e 0,5 A.....	45
Figura 12: Aspecto final (80 min) da água após eletrocoagulação. Sendo que: A) para 0,2 A de corrente elétrica; B) para 0,5 A de corrente elétrica.....	46
Figura 13: Remoção do parâmetro cor aparente através da eletrocoagulação e adição de cloreto férrico.....	47
Figura 14: Remoção do parâmetro cor aparente através da eletrocoagulação e adição de Tanfloc SG. ....	47
Figura 15: Amostra com 50 mg.L <sup>-1</sup> de cloreto férrico e 0,5 A de corrente. Sendo que: A) aos 20 minutos de processo; B) 80 minutos do processo. ....	49

Figura 16: Aspecto da água no experimento com coagulante orgânico. Sendo que: A) amostra no frasco para medição de cor aparente; B) aspecto da água aos 5 minutos; C) aspecto aos 40 minutos; D) aspecto aos 80 minutos do experimento. ....	50
Figura 17: Remoção do parâmetro turbidez através da eletrocoagulação com corrente elétrica de 0,2 A e 0,5 A. ....	51
Figura 18: Remoção do parâmetro turbidez através da eletrocoagulação e adição cloreto férrico.....	53
Figura 19: Remoção do parâmetro turbidez através da eletrocoagulação e adição de Tanfloc SG. ....	53
Figura 20: Gráfico da variação do pH do processo de eletrocoagulação para cada ensaio.....	55
Figura 21: Teste de significância para a eletrocoagulação sem adição de coagulante. ....	57
Figura 22: Gráfico de superfície de resposta para a eletrocoagulação sem a presença de agente coagulante.....	57
Figura 23: Gráficos de variáveis independentes e sua interação com os parâmetros cor aparente, turbidez e pH; para a eletrocoagulação sem a presença de agente coagulante.....	58
Figura 24: Teste de significância para a eletrocoagulação com coagulante inorgânico. ....	60
Figura 25: Gráfico de superfície de resposta para a eletrocoagulação com adição de coagulante inorgânico. ....	60
Figura 26: Gráficos de variáveis independentes e sua interação com os parâmetros cor aparente, turbidez e pH; para a eletrocoagulação com adição de coagulante inorgânico. ....	61
Figura 27: Teste de significância para a eletrocoagulação com coagulante orgânico....	62
Figura 28: Gráfico de superfície de resposta para a eletrocoagulação com adição de coagulante orgânico. ....	63
Figura 29: Gráficos de variáveis independentes e sua interação com os parâmetros cor aparente, turbidez e pH; para a eletrocoagulação com adição de coagulante orgânico. ....	63
Figura 30: Variação da remoção da turbidez em função do tempo para cinética de terceira ordem para a eletrocoagulação somente. ....	65



Figura 31: Variação da remoção da turbidez em função do tempo para cinética de terceira ordem para a eletrocoagulação com adição de Cloreto Férrico. ....66

Figura 32: Variação da remoção da turbidez em função do tempo para cinética de terceira ordem para a eletrocoagulação com adição de Tanfloc SG.....66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros analisados, equipamentos e metodologia.....	33
Tabela 2: Características da amostra coletada.....	38
Tabela 3: Os valores da velocidade (k) e do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para os dados linearizados da cinética de primeira ordem do processo de eletrocoagulação....	67
Tabela A.1: Resultados dos ensaios de eletrocoagulação sem adição de coagulante, seguindo planejamento experimental.....	76
Tabela A.2: Resultados dos ensaios de eletrocoagulação com adição de coagulante inorgânico cloreto férrico, seguindo planejamento experimental.....	76
Tabela A.3: Resultados dos ensaios de eletrocoagulação com adição de coagulante orgânico tanfloc SG, seguindo planejamento experimental.....	77
Tabela B.1: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 3.....	79
Tabela B.2: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 4.....	80
Tabela B.3: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 9.....	81
Tabela B.4: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 11.....	82
Tabela B.5: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 10.....	83
Tabela B.6: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 12.....	84
Tabela B.7: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 17.....	85
Tabela B.8: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 19.....	86
Tabela B.9: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 18.....	87

Tabela B.10: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 20. ....	88
Tabela C.1: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação sem adição de coagulante, com 0,2 A de corrente elétrica. ....	90
Tabela C.2: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação sem adição de coagulante, com 0,5 A de corrente elétrica. ....	91
Tabela C.3: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 25 mg.L <sup>-1</sup> coagulante inorgânico, com 0,2 A de corrente elétrica. ....	92
Tabela C.4: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 25 mg.L <sup>-1</sup> coagulante inorgânico, com 0,5 A de corrente elétrica. ....	93
Tabela C.5: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 50 mg.L <sup>-1</sup> coagulante inorgânico, com 0,2 A de corrente elétrica. ....	94
Tabela C.6: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 50 mg.L <sup>-1</sup> coagulante inorgânico, com 0,5 A de corrente elétrica. ....	95
Tabela C.7: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 25 mg.L <sup>-1</sup> coagulante orgânico, com 0,2 A de corrente elétrica. ....	96
Tabela C.8: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 25 mg.L <sup>-1</sup> coagulante orgânico, com 0,5 A de corrente elétrica. ....	97
Tabela C.9: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 50 mg.L <sup>-1</sup> coagulante orgânico, com 0,2 A de corrente elétrica. ....	98
Tabela C.10: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 50 mg.L <sup>-1</sup> coagulante orgânico, com 0,5 A de corrente elétrica. ....	99

## LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS

A	Ampere
$C_A$	Concentração Final do Parâmetro Turbidez (uT)
$C_{A0}$	Concentração Inicial do Parâmetro Turbidez (uT)
cm	Centímetros
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ETA	Estação de Tratamento de Água
Fe	Ferro
g	Grama
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K	Constante de Velocidade (uT/min)
Km	Quilômetro
L	Litro
min	Minuto
mg	Miligrama
$mg.L^{-1}$	Miligrama por Litro
mL	Mililitro
°C	Graus Celsius
ONU	Organização das Nações Unidas
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PVC	Policloreto de Polivinila
$R^2$	Coefficiente de Determinação
rpm	Rotação por minuto
SAMAE	Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto
SANEPAR	Companhia de Saneamento do Paraná
SUREHMA	Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente
T	Tempo (min)
uH	Unidade Hazen ou $mg.L^{-1}$ de Platina-Cobalto
uT	Unidade de Turbidez

V

Volts

VMP

Valor Máximo permitido

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
3.1 A ÁGUA, SUA IMPORTÂNCIA E PROBLEMÁTICA.....	18
3.2 TRATAMENTO DE ÁGUA .....	19
3.3 ELETROCOAGULAÇÃO .....	20
3.4 ESTUDO CINÉTICO.....	21
3.5 COAGULANTES INORGÂNICOS .....	22
3.6 COAGULANTES ORGÂNICOS .....	23
3.7 LEGISLAÇÃO .....	24
3.7.1 <i>Lei 11.445/2007 da Presidência da Republica</i> .....	25
3.7.2 <i>Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde</i> .....	25
3.7.3 <i>Resolução 357/2005 do CONAMA</i> .....	26
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	27
4.2 AMOSTRAGEM.....	28
4.3 REATOR.....	29
4.4 PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES COAGULANTES .....	31
4.4.1 <i>Solução do Coagulante Tanfloc SG</i> .....	31
4.4.2 <i>Solução do Coagulante Cloreto Férrico</i> .....	31
4.5 ANÁLISE DOS PARÂMETROS .....	32
4.6 PROCEDIMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	33
4.6.1 <i>Adição de Sal para Aumentar a Corrente Elétrica</i> .....	33
4.6.2 <i>Procedimentos para Análise dos Resultados</i> .....	34
4.6.3 <i>Procedimentos para a Adição de Coagulantes</i> .....	34
4.7 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	35
4.8 ESTUDO CINÉTICO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO.....	36
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>38</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA COLETADA.....	38
5.2 ANÁLISE DA REMOÇÃO DOS PARÂMETROS COR APARENTE E TURBIDEZ DE ACORDO COM OS ENSAIOS .....	39
5.2.1 <i>Eletrocoagulação sem uso de Coagulantes</i> .....	39
5.2.2 <i>Eletrocoagulação com adição de Cloreto Férrico</i> .....	40
5.2.3 <i>Eletrocoagulação com adição de Tanfloc SG</i> .....	41
5.2.4 <i>Análise Conjunta de todos os ensaios</i> .....	42
5.3 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS COR APARENTE E TURBIDEZ EM RELAÇÃO AO TEMPO .....	43
5.3.1 <i>Remoção de Cor aparente</i> .....	44
5.3.2 <i>Remoção de Turbidez</i> .....	50

5. 4 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO pH .....	54
5. 5 ANÁLISE CONFORME O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	56
5. 5. 1 <i>Eletrocoagulação</i> .....	56
5. 5. 2 <i>Eletrocoagulação com adição de Cloreto Férrico</i> .....	59
5. 5. 3 <i>Eletrocoagulação com adição de Tanfloc SG</i> .....	62
5. 6 ESTUDO CINÉTICO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO .....	64
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>68</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Para a Organização das Nações Unidas (ONU, 2009), a água limpa é essencial para a manutenção da vida terrestre, e desta forma para o funcionamento de todos os ecossistemas, comunidades e economias existentes. No Brasil, 11,8% da população vive sem nenhum tipo de tratamento de água, e 30,8% da parcela da população que conta com Estação de Tratamento de Água (ETA), não se beneficiam de um tratamento convencional completo (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2008).

A Lei Federal de número 11.445 de 5 de janeiro de 2007, que estabelece as diretrizes nacionais do saneamento básico, cita como sendo parte de seus princípios fundamentais, entre outros, a universalização do acesso e o abastecimento de água realizada de forma adequada à saúde pública e à proteção do meio ambiental.

No tratamento de água atualmente utilizado no país um dos primeiros passos a ser realizado, logo na entrada da água bruta na ETA, é a coagulação química, que consiste em adicionar o composto químico para atuar como agente coagulante ao afluente de água bruta na ETA, que seguirá para o restante dos processos do tratamento (PAVANELLI, 2001).

Nos sistemas de tratamento brasileiros, segundo Coral (2009), os coagulantes inorgânicos a base de sais de ferro e de alumínio, são convencionalmente aplicados e empregados na grande maioria de ETAs. Esses coagulantes são efetivos na remoção de grandes variedades de impurezas da água, porém, a presença destes metais, como por exemplo, o alumínio no lodo gerado pela estação de tratamento, pode gerar um potencial poluente para o solo e corpos d'água.

A eletrocoagulação, é uma opção para o combate ou diminuição da presença dos sais metálicos no lodo das ETAs. Ela é, de acordo com Bensadok (2001), um processo em que se utiliza um eletrodo metálico para sofrer ações de oxidação e redução para formar íons metálicos por meio da passagem de corrente elétrica contínua. Estes íons metálicos se combinam com íons hidroxilas formados pela hidrólise da água, resultando em hidróxidos metálicos que desestabilizam os sólidos presentes na água causando a coagulação destes. De acordo com Crespilho e



Rezende (2005) os eletrodos mais comuns são ferro e alumínio, graças a sua eficiência, preço e disponibilidade. Entretanto, alguns pesquisadores afirmam que o uso do ferro é vantajoso para o tratamento de água diante do alumínio, pois não apresenta efeitos tóxicos.

Em outras palavras, a eletrocoagulação, é um possível método para se realizar a coagulação dos sólidos da água sem a necessidade de agentes coagulantes, ou com a diminuição da dosagem dos coagulantes a serem adicionados.

Desta forma, o objetivo deste trabalho é analisar se a eletrocoagulação, pode ser utilizada de forma eficaz no processo de tratamento de água substituindo a coagulação convencional, ou se pode ser empregado para potencializar essa etapa do tratamento, combinando a técnica da eletrocoagulação com a aplicação de coagulante inorgânico (cloreto férrico) e coagulante orgânico (Tanfloc SG).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Aplicação do processo de eletrocoagulação para o tratamento de água, e análise da eficiência do processo comparando os resultados à adição de coagulante orgânico (Tanfloc SG) e coagulante inorgânico (Cloreto Férrico).

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudo das eficiências de remoções dos parâmetros Cor, Turbidez e acompanhamento do parâmetro pH;
- Análisar o efeito dos coagulantes orgânico Tanfloc SG e inorgânico cloreto férrico em relação ao tempo;
- Estudo cinético de primeira ordem da variação de concentração do parâmetro turbidez;

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 A ÁGUA, SUA IMPORTÂNCIA E PROBLEMÁTICA

Os ciclos de energia física, química e biológica que geram ou conservam as diversas formas de vida no planeta, estão fortemente ligados ao ciclo da água (REBOUÇAS, 1997). Segundo a ONU (2009) a água potável limpa, segura e adequada é vital para todos os organismos vivos e para o funcionamento dos ecossistemas, comunidades e economias.

Coral (2009), diz que mesmo o Brasil apresentando uma privilegiada disponibilidade hídrica, a combinação do crescimento acentuado das demandas localizadas e da deterioração da qualidade das águas, origina os principais problemas envolvendo a escassez hídrica do país, criando uma situação preocupante.

Para Pavanelli (2001), há uma limitação da disponibilidade de água doce em nosso planeta, sendo prevista a escassez deste recurso para consumo humano ainda neste século segundo comprovação teórica através da verificação do balanço global da terra por defensores do meio ambiente. A degradação da natureza de forma descontrolada através dos lançamentos de resíduos nos rios e a substituição da mata ciliar por plantações agrícolas, dentre outros procedimentos que causam grandes prejuízos ambientais, geram grande aumento da turbidez dos cursos d'água, assim como a diminuição da qualidade da mesma com uma crescente variedade de componentes químicos, físicos e biológicos.

O tratamento efetivo para consumo humano, fica cada vez mais dificultado e encarecido, necessitando crescente envolvimento de cientistas e pesquisadores da área de saneamento e meio ambiente nesta gama de variáveis que influenciam diretamente a qualidade da água (PAVANELLI, 2001).

### 3. 2 TRATAMENTO DE ÁGUA

De acordo com IBGE (2008), 87,2% dos municípios brasileiros possuem sistema de tratamento de água. Destes, 69,2% recebem tratamento convencional completo em uma ETA, onde há pelo menos a presença dos processos de floculação, decantação, filtração e desinfecção.

Mais especificamente, no Estado do Paraná, 100% dos municípios possuem algum tratamento de água, e aproximadamente 41% destes recebem tratamento convencional segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB) (2008).

A Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR) é a responsável pelo abastecimento de aproximadamente 86% dos municípios do Paraná, atendendo mais de 10,4 milhões de pessoas todos os dias. De acordo com a companhia a primeira etapa de seu sistema de tratamento é a captação, onde a água bruta é captada de mananciais ou poços e transportada para as ETAs por meio de tubulações.

Em seguida, no processo de coagulação, a água já nos tanques da estação de tratamento, recebe uma dosagem de coagulante químico a fim de aglomerar as partículas sólidas presente na mesma. Após a coagulação, a água é posta em movimento em tanques de concreto para que suas partículas coaguladas se aglutinem formando flocos, caracterizando assim a Floculação que é seguida pela Decantação, onde a água é mantida em repouso em outros tanques, para que a ação da gravidade faça com que os flocos formados na etapa anterior se depositem no fundo dos mesmos (SANEPAR, 2011).

Ainda de acordo com a SANEPAR, a etapa seguinte é a filtração, onde as impurezas da água ficam retidas ao passar por um filtro de carvão, areia e pedras, completando o tratamento físico da água.

O tratamento químico conta com os últimos três processos sendo estes a Desinfecção, Fluoretação e Correção de pH. No primeiro, ocorre a adição de cloro ou ozônio para a eliminação de microrganismo patogênicos. Em seguida, para o combate da cárie dentária infantil e seguindo os padrões da Organização Mundial da Saúde (OMS), há a adição de flúor, por fim, adiciona-se cal hidratada ou carbonato de sódio para o ajuste alcalino da água (SANEPAR, 2011).

### 3.3 ELETROCOAGULAÇÃO

Segundo Bensadok (2007) a eletrocoagulação é um processo em que, por meio da passagem contínua de corrente elétrica, um eletrodo metálico sofre ações de oxidação e redução formando íons metálicos que se combinam com íons hidroxilas formados através da hidrólise da água. A combinação resulta na formação de hidróxidos metálicos que desestabiliza os sólidos suspensos favorecendo assim a coagulação dos mesmos.

Combat (2014) afirma que o processo de eletrocoagulação realiza as etapas da coagulação convencional liberando o coagulante *in situ*, a partir da liberação de espécies químicas hidrolisadas pelos eletrodos de sacrifício.

Para Santolin et al. (2015), a eletrocoagulação consiste em um processo que por meio da variação de potencial aplicada aos eletrodos, gera a desestabilização molecular na água, formando hidróxidos e efeitos de coagulação.

A eletrocoagulação dispensa a adição de agente coagulante adicional, e limita a liberação de agente químico na água tendo um maior controle comparado aos processos convencionais, desta forma minimiza a quantidade de xenobióticos presentes no produto final, e conseqüentemente, a quantidade consumida pela população. Os flocos formados apresentam uma melhor estabilidade, podendo ser filtrados mais facilmente, além de apresentar menor tempo de sedimentação, assim como menor tempo de retenção da água no processo (THEODORO, 2010).

Entretanto, de acordo com Theodoro (2010), o uso constante da eletricidade pode encarecer o processo, existindo também, a possível necessidade de troca regular do eletrodo, uma vez que o processo requer o desgaste dos mesmos para seu funcionamento.

Crespilho e Rezende (2004), em seu trabalho sobre a eletroflotação, que é baseada nos mesmos princípios e processos da eletrocoagulação, dizem que o processo envolve a geração de coagulantes *in situ* e que o conjunto de eletrodos é o seio do processo. Os eletrodos mais comuns são ferro e alumínio, graças a sua eficiência, preço e disponibilidade. Entretanto, alguns pesquisadores afirmam que o uso

do ferro é vantajoso para o tratamento de água diante do alumínio, pois não apresenta efeitos tóxicos.

Bazrafshan (2011), diz que o processo de eletrocoagulação é complexo e pode ser afetado por uma grande quantidade de parâmetros, como concentração inicial de poluentes, pH inicial e potência elétrica (voltagem). Bazrafshan (2011) aplicou esse processo à água destinada a consumo humano, a fim de avaliar a remoção de flúor utilizando eletrodos de ferro e alumínio. Variando a concentração de flúor e pH inicial, tempo de reação e voltagem aplicada, os melhores resultados foram obtidos com os valores de tempo e voltagem mais altos (60 min e 40 V), para ambos os eletrodos (Fe e Al) e ambas concentrações de flúor e pH inicial. Neste experimento, a variação da concentração de poluente e pH inicial não afetou significativamente os resultados.

Adapureddy (2012) aplicou o processo de eletrocoagulação para a remoção de turbidez para a água potável. Utilizando eletrodos de aço, e argila para aumentar a turbidez inicial da água, o autor avaliou os seguintes parâmetros: Voltagem aplicada (5 a 25 V), pH inicial (5 a 11), turbidez inicial (100 e 500 uT) e distancia interna dos eletrodos (1 a 4 cm). Os melhores resultados foram obtidos com valores mais altos de Voltagem e turbidez inicial aplicada (25 V e 500 uT). Para o pH inicial, o valor ótimo encontrado para a remoção de turbidez foi 8 (99% de remoção). O interessante deste parâmetro foi que para todos os pH iniciais aplicados os pH finais variaram entre 7 e 8, indicando uma tendência de neutralização durante o processo, ou seja, na eletrocoagulação, quando o pH inicial for ácido o tratamento tende a aumentá-lo, e quando o pH inicial for alcalino o pH final tende a cair. Para o distanciamento dos eletrodos, os melhores resultados foram obtidos com distanciamento de 2 cm.

### 3. 4 ESTUDO CINÉTICO

De acordo com Theodoro (2012), o estudo cinético analisa a velocidade em que as reações ocorrem, ou seja, como as concentrações de certas espécies moleculares variam em relação ao tempo.

Segundo Levenspiel (2000) existem dois métodos para analisar dados cinéticos: o método integral e o método diferencial de análise. Levenspiel (2000) afirma que ambos os procedimentos apresentam vantagens e desvantagens, sendo que o segundo é de fácil utilização, recomendado para o teste de mecanismos específicos ou de expressões de taxa relativamente simples, sugerindo-se que a análise integral seja testada primeiro, recorrendo ao método diferencial caso não haja sucesso.

Desta forma, no método de análise integral uma forma particular de equação de taxa é suposta (por exemplo, equação de taxa de primeira ordem) e, após integração e manipulações matemáticas apropriadas, deve-se obter uma linha reta em um gráfico expressando uma determinada concentração versus tempo. Para a taxa de reação ser considerada aceitável, os dados são plotados em um gráfico e uma reta deve ser razoavelmente obtida. Assim, pode-se concluir que o método de análise integral é um teste negativo, que permite rejeitar uma equação de taxa quando houver evidências suficientes contra este, e então, parte-se para a análise de outra equação de taxa (por exemplo, equação de taxa de segunda ordem) (LEVENSPIEL, 2000)

### 3. 5 COAGULANTES INORGÂNICOS

Os coagulantes químicos como os sais de alumínio e ferro são os mais utilizados no processo de coagulação convencional. Quando adicionados ao processo, ocorre a hidrólise do sal do metal, formando hidróxidos, de acordo com os valores de pH e concentração do coagulante. Além dos hidróxidos, são formados íons hidroximetálicos monoméricos e polímeros de íons hidroximetálicos. As diferentes interações destas espécies metálicas com os poluentes presentes na água possibilitam sua remoção. Os principais produtos químicos utilizados no processo de coagulação são o Sulfato de Alumínio e o Cloreto Férrico (COMBAT, 2014).

O cloreto férrico tem aproximadamente o dobro da carga positiva por peso seco do que o sulfato de alumínio, de acordo com Pádua (2000). Desta forma, a metade da dosagem deste coagulante em relação ao segundo é esperada para a remoção de certas impurezas.

Segundo Pádua (2000), as remoções de substâncias húmicas são favorecidas com o uso do cloreto férrico, visto que este apresenta um maior consumo de alcalinidade e assim, atinge uma maior redução de pH do que o sulfato de alumínio. Ainda em relação a estes dois coagulantes, ressalta-se que geralmente, quando a água a ser tratada apresenta altos valores de pH e alcalinidade, o uso do cloreto férrico apresenta melhores resultados.

Segundo Pavanelli (2001), o cloreto férrico é formado a partir da reação do ácido clorídrico a altas temperaturas, concentrado com o minério de ferro, subsequente de resfriamento e filtração. Contendo a fórmula química  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  e massa molecular de 270,35 g, quando em elevados valores de pH, este coagulante demonstra eficácia na diminuição de turbidez e da demanda biológica de oxigênio (DBO), assim como na remoção de fosfatos, alguns metais pesados ou venenosos como mercúrio, chumbo, arsênio, selênio e bário.

Pavanelli (2001) afirma que para uma água bruta elevada turbidez (aproximadamente 100 uT) o intervalo de pH entre 5,90 e 6,71 se mostraram ótimos para o uso deste coagulante, com dosagens de  $23 \text{ mg.L}^{-1}$  a  $78 \text{ mg.L}^{-1}$ . Para um pH entre 5,87 a 6,25 os melhores resultados foram obtidos com dosagens entre  $130 \text{ mg.L}^{-1}$  a  $220 \text{ mg.L}^{-1}$ .

De acordo com Trevisan (2014), com uma água com características chuvosas e turbidez elevada a concentração de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  de Cloreto Férrico foi a que apresentou melhores resultados com um tempo de processo de 20 minutos. Para uma água coletada em período de estiagem, e desta forma, com turbidez baixa, o valor ótimo encontrado para a concentração de cloreto férrico foi de  $10 \text{ mg.L}^{-1}$  para um tempo de processo maior que 30 minutos.

### 3. 6 COAGULANTES ORGÂNICOS

Segundo Bongiovani (2010) a presença de metais na água provenientes do uso de sais metálicos como agentes coagulantes pode causar dano ao organismo humano, principalmente ao sistema nervoso. Por serem biodegradáveis e atóxicos, além de



produzirem menos lodo e com menos metais, os coagulantes naturais se mostram vantajosos em relações aos convencionais.

Um possível coagulante natural é o Tanfloc SG. Segundo Pedroso (2012), o coagulante natural a base de tanino, proveniente da Acácia-Negra, é um polímero orgânico catiônico com pequeno peso molecular. Ele age neutralizando cargas das partículas coloidais e formando pontes entre elas, conseqüentemente, há a formação de flocos e a sedimentação.

Coral (2009), afirma que o tanino age nos sistemas coloidais, formando flocos a partir da neutralização das cargas e formação de pontes entre essas partículas. Segundo a autora, o tanino não consome alcalinidade do meio e desta forma, não altera o pH da água tratada, apresentando uma efetividade na faixa entre 4,5 a 8 de pH. Utilizando uma água bruta com pH inicial de 6,93 e 12,67 uT de turbidez, a concentração ótima encontrada pela autora foi de 40 mg.L<sup>-1</sup> de Tanfloc SG.

Zolett (2013) obteve uma turbidez final de 1,18 uT utilizando o Tanfloc SG, sendo que a amostra original de 1 litro de água apresentava 20,5 uT de turbidez, com a concentração ótima de 0,70 mL.L<sup>-1</sup> utilizando diluição de 1% em água destilada.

De acordo com Trevisan (2014), com uma água com características chuvosas e turbidez elevada a concentração de 25 mg.L<sup>-1</sup> de Tanfloc SG foi a que apresentou melhores resultados com um tempo de processo de 30 minutos. Entretanto as concentrações de 45 e 25 mg.L<sup>-1</sup>, atingiram resultados dentro dos padrões de potabilidade, com um tempo de processo de 10 minutos.

Para uma água coletada em período de estiagem, e desta forma, com turbidez baixa, Trevisan (2014) afirma que o valor ótimo encontrado para a concentração de Tanfloc SG foi de 10 mg.L<sup>-1</sup> para um tempo de processo maior que 20 minutos.

### 3. 7 LEGISLAÇÃO

No Brasil, existe grande variedade de legislações e órgãos responsáveis pelas diretrizes e qualidade da água para consumo humano. Dentre essas, a fim de verificar atendimento as leis brasileiras e estaduais para os resultados deste trabalho, destaca-

se a Lei 11.445 de 5 de janeiro de 2007, a Portaria 2.914 de 2011 do Ministério da Saúde, a Resolução do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) 357 de 17 de março de 2005 e a Resolução do CONAMA 430 de 13 de maio de 2011.

### 3. 7. 1 Lei 11.445/2007 da Presidência da Republica

Esta Lei estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Nela esta capitulada os princípios fundamentais, o exercício da titularidade, a prestação regionalizada de serviços públicos, o planejamento, a regulamentação, os aspectos econômicos, sociais e técnicos e a política federal do saneamento básico.

No capítulo I desta lei, no parágrafo I do artigo 3º, inciso a, consta que saneamento básico pode ser considerado como, porém, não somente, o conjunto de serviços, infraestruturas e instalações operacionais necessárias para o abastecimento público de água potável, desde sua captação até sua distribuição.

O artigo 9º do capítulo II, em seu parágrafo III diz que os titulares dos serviços públicos de saneamento básico devem adotar parâmetros para a garantia do atendimento essencial à saúde pública, inclusive quanto ao volume mínimo per capita de água para abastecimento público, observando as normas nacionais relativas à potabilidade da água.

### 3. 7. 2 Portaria 2.914/2011 do Ministério da Saúde

Dispõe sobre o padrão de qualidade e potabilidade da água para consumo humano e sobre os procedimentos de controle e fiscalização desta. Em outras palavras, a portaria define os parâmetros a serem analisados para a classificação da água como potável, assim como seus valores limites.

O anexo X desta portaria, define o valor máximo permitido (VMP) para a cor aparente como 15 uH (mg.Pt.L<sup>-1</sup>) e 5 uT para turbidez. O mesmo anexo, dita que o

VMP para a concentração final de alumínio presente na água é de 0,2 mg.L<sup>-1</sup> e 0,3 mg.L<sup>-1</sup> para a concentração de Ferro.

De acordo com o artigo 39<sup>o</sup>, recomenda-se que o pH da água, em sua distribuição seja mantido entre 6,0 a 9,5.

### 3. 7. 3 Resolução 357/2005 do CONAMA.

Esta resolução dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e estabelece quais devem ser os padrões de lançamento de efluentes, entre outras providências.

De acordo com a portaria da Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (SUREHMA) de número 3 de 21 de março de 1991, os cursos d'água da Bacia do Tibagi pertencem a classe 2, que de acordo com o CONAMA 357/05, são as águas que podem ser utilizadas para abastecimento público após tratamento convencional. Esta mesma resolução dispõe que para águas doces de classe 2 a cor verdadeira deve ser de até 75 mg Pt.L<sup>-1</sup>, com uma turbidez de até 100 uT e respeitando as concentrações máxima de 0,1 mg.L<sup>-1</sup> e 0,3 mg.L<sup>-1</sup> de Ferro e Alumínio dissolvidos respectivamente. O pH da água, de acordo com a Resolução do CONAMA 430/2011 complementa e altera a Resolução nº 357/05, deve estar entre 5 e 9.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para o presente trabalho, foram coletadas amostras na chegada da água do Rio Jacutinga ao Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE), que se encontra na Avenida Santos Dumont 565, no Centro da Cidade de Ibiporã, localizada no terceiro Planalto Paranaense, a uma distância de 14 km da cidade de Londrina.

. Com uma população de 48.198 habitantes segundo IBGE (2010), e área de 298,870 m<sup>2</sup>, Ibiporã encontra-se na Sub-bacia do Rio Tibagi, que é o principal afluente do Rio Paranapanema, percorrendo uma distância de 550 km.

O município de Ibiporã apresenta clima subtropical úmido mesotérmico, que caracteriza a presença de períodos chuvosos no verão, sem estação seca bem definida, com temperatura mínima média de 16,8°C e máxima de 26,8°C (PREFEITURA DE IBIPORÃ, 2015).

O índice pluviométrico da cidade conta com 1.531,3 mm anuais sendo os meses mais chuvosos novembro, dezembro e janeiro e os menos chuvosos junho, julho e agosto. O relevo predominante é o Suave Ondulado (PREFEITURA DE IBIPORÃ, 2015).

Na Figura 1, pode-se observar um mapa do município de Ibiporã com a localização da SAMAE.



**Figura 1: Mapa com a localização da SAMAE Ibiporã.**  
**Fonte: Google Earth Pro (2016).**

## 4. 2 AMOSTRAGEM

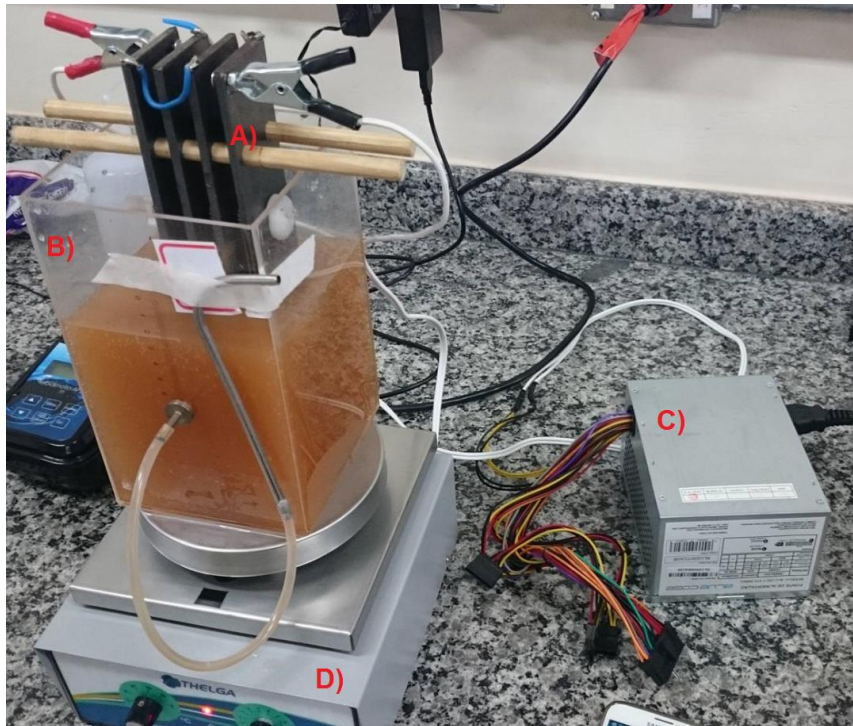
A amostragem foi realizada na entrada da estação de tratamento de água da SAMAE do município de Ibiporã, no dia 23 de junho de 2016, por meio de duas bombonas de 60 litros que foram sujeitas a tríplice lavagem com a água a ser estudada antes da coleta. Na Figura 2 pode-se observar o momento da coleta na chegada da água bruta a ETA.



**Figura 2: Coleta realizada na chegada da água bruta na ETA da SAMAE Ibiporã. Fonte Autoria própria (2016).**

#### 4.3 REATOR

O reator utilizado no trabalho foi construído de forma similar ao dispositivo utilizado por Theodoro (2010). Este foi montado usando um recipiente de acrílico de forma retangular com 12 cm de largura, 12 cm de comprimento e 20 de altura; um agitador magnético, um sistema de eletrodos monopolares e uma fonte de corrente contínua; como pode ser visto na Figura 2:



**Figura 3: Reator de eletrocoagulação em nível de bancada. Sendo que: A) sistema de eletrodos monopolares; B) recipiente utilizado no reator; C) fonte de corrente elétrica; D) agitador eletromagnético.**

**Fonte: Aatoria Própria (2016).**

O sistema de eletrodos monopolares foi disposto por meio de 4 placas de ferro conectadas em paralelo e fixadas por parafusos de policloreto de polivinila (PVC), originando 2 pares de eletrodos com distância de 1 cm entre eles. Estas placas apresentam 20 cm de altura, 5 cm de largura e 3 mm de espessura, sendo que o isolamento e distanciamento entre elas foi feito de forma equidistante. Conectores fixados com parafuso metálico e fio de cobre foram utilizados para interligar as placas de mesma polaridade. A escolha do ferro ao invés do alumínio deve-se ao baixo preço e acessibilidade, pois para o alumínio só foi encontrada a opção pela compra da placa inteira (a menor encontrada foi de 2 x1), e a não presença de substâncias tóxicas. Este sistema pode ser observado na Figura 3.





**Figura 4: Esquema do sistema de eletrodos monopolares do reator.  
Fonte: Autoria própria (2016).**

#### 4. 4 PREPARAÇÃO DAS SOLUÇÕES COAGULANTES

##### 4. 4. 1 Solução do Coagulante Tanfloc SG

A solução do coagulante orgânico Tanfloc SG foi obtida seguindo a metodologia utilizada por Trevisan (2012), através da pesagem de 1 g de Tanfloc SG diluído em um balão volumétrico contendo 1 L de volume, desta forma a concentração obtida foi de  $1 \text{ g.L}^{-1}$ .

##### 4. 4. 2 Solução do Coagulante Cloreto Férrico

Seguindo metodologia utilizada por Trevisan (2012), a solução do coagulante inorgânico cloreto férrico foi obtido através da pesagem de 1 g de cloreto férrico diluído em um balão volumétrico contendo 1 L de volume, desta forma a concentração obtida



foi de  $1 \text{ g.L}^{-1}$ . O coagulante foi um reagente analítico da marca Synth, contendo fórmula química  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  e peso molecular  $270,30 \text{ g.mol}^{-1}$ . A Figura 4 mostra a solução do coagulante inorgânico cloreto férrico pronta.



**Figura 5: Solução coagulante de cloreto férrico.**  
**Fonte: Autoria própria (2016)**

#### 4. 5 ANÁLISE DOS PARÂMETROS

Para realizar a análise dos parâmetros foi utilizado a metodologia de acordo com o Standard Methods of Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012) como pode ser visto na Tabela 1.

**Tabela 1: Parâmetros analisados, equipamentos e metodologia.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Equipamento</b>	<b>Metodologia</b>
<b>Cor aparente</b>	Espectrofotômetro HACH 4000	2120 C
<b>Turbidez</b>	Turbidímetro Policontrol	2030 B
<b>Condutividade Elétrica</b>	Condutivímetro Mca 150	2510 B
<b>pH</b>	pHmetro mPA-210	4500 B

**Fonte: Standard Methods of Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012).**

#### 4. 6 PROCEDIMENTOS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Para realização dos ensaios de eletrocoagulação alguns procedimentos foram necessários para garantir uma situação favorável para limpeza da água através da coagulação, floculação e sedimentação das impurezas presentes nesta, de acordo com a necessidade de cada ensaio.

Durante os ensaios três tratamentos foram analisados: a eletrocoagulação sem adição de coagulantes, a eletrocoagulação com a adição do coagulante inorgânico cloreto férrico e a eletrocoagulação com adição do coagulante orgânico TANFLOC SG.

##### 4. 6. 1 Adição de Sal para Aumentar a Corrente Elétrica

Afim de obter um aumento na corrente elétrica utilizada no processo, 0,5 gramas de sal de cozinha foram adicionados as amostras durante os ensaios em que este aumento era desejado, desta forma, nos ensaios em que constam a utilização de 0,5 A de corrente elétrica foram adicionados 250 mg.L<sup>-1</sup> de sal.

O sal foi adicionado no momento em que o reator eletromagnético foi ligado nos ensaios para a eletrocoagulação sem uso de coagulantes e juntamente com a adição dos coagulantes nos ensaios em que estes foram utilizados.

#### 4. 6. 2 Procedimentos para Análise dos Resultados

Para realizar a medição dos parâmetros e análise dos resultados, ao final de cada ensaio (40 e 80 minutos de processo) amostras foram coletadas para a verificação dos parâmetros pH, cor e turbidez.

Nos ensaios com tempo de processo de 80 minutos, amostras de 19 mL eram coletadas de 5 em 5 minutos para a medição de cor aparente e turbidez. A realização das leituras destes parâmetros foi feita somente após a coleta seguinte, desta forma, a amostra se mantinha em repouso por aproximadamente 5 minutos e meio para garantir a decantação de possíveis impurezas (resíduos de Ferro) que pudessem comprometer os resultados das análises.

#### 4. 6. 3 Procedimentos para a Adição de Coagulantes

Nos ensaios em que foram adicionados agentes coagulantes, as medições começaram a ser feitas 18 minutos após o início do processo, as soluções foram despejadas na amostra no momento da ativação do reator. Nestes 18 minutos, foi realizada a agitação da amostra através de um agitador eletromagnético sendo 3 minutos de agitação rápida a 10 rpm e 15 minutos de agitação lenta a 2 rpm. Após esse tempo, o agitador era desligado e as coletas eram feitas normalmente de acordo com o item 5. 6. 2.

#### 4. 7 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O Quadro 1 representa o planejamento estatístico utilizado neste trabalho. Para processo de eletrocoagulação sem a adição de agente coagulante, utilizou-se dois fatores ou variáveis independentes (corrente e tempo) e para o processo de eletrocoagulação utilizando coagulantes inorgânico e orgânico (cloreto férrico e Tanfloc SG), foram utilizadas três variáveis independentes (concentração, corrente e tempo); no total foram necessários 20 ensaios que obtiveram três respostas (cor, turbidez e pH).

<b>PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL</b>						
<b>Planejamento fatorial para corrente e tempo para o processo de eletrocoagulação sem a adição de agente coagulante.</b>						
<b>Ensaio</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Cor (uH)</b>	<b>Turbidez (uT)</b>	<b>pH</b>	
<b>2</b>	1,0 (0,5)	-1,0 (40)				
<b>3</b>	-1,0 (0,2)	1,0 (80)				
<b>4</b>	1,0 (0,5)	1,0 (80)				
<b>1</b>	-1,0 (0,2)	-1,0 (40)				
<b>Planejamento fatorial para corrente e tempo para o processo de eletrocoagulação com a adição de agente coagulante inorgânico cloreto férrico.</b>						
<b>Ensaio</b>	<b>Concentração (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Cor (uH)</b>	<b>Turbidez (uT)</b>	<b>pH</b>
<b>12</b>	1,0 (50)	1,0 (0,5)	1,0 (80)			
<b>7</b>	-1,0 (25)	1,0 (0,5)	-1,0 (40)			
<b>11</b>	-1,0 (25)	1,0 (0,5)	1,0 (80)			
<b>5</b>	-1,0 (25)	-1,0 (0,2)	-1,0 (40)			
<b>10</b>	1,0 (50)	-1,0 (0,2)	1,0 (80)			
<b>8</b>	1,0 (50)	1,0 (0,5)	-1,0 (40)			

6	1,0 (50)	-1,0 (0,2)	-1,0 (40)			
9	-1,0 (25)	-1,0 (0,2)	1,0 (80)			
<b>Planejamento fatorial para corrente e tempo para o processo de eletrocoagulação com a adição de agente coagulante orgânico Tanfloc SG.</b>						
Ensaio	Concentração (mg.L <sup>-1</sup> )	Corrente (A)	Tempo (min)	Cor (uH)	Turbidez (uT)	pH
20	1,0 (50)	1,0 (0,5)	1,0 (80)			
15	-1,0 (25)	1,0 (0,5)	-1,0 (40)			
19	-1,0 (25)	1,0 (0,5)	1,0 (80)			
13	-1,0 (25)	-1,0 (0,2)	-1,0 (40)			
18	1,0 (50)	-1,0 (0,2)	1,0 (80)			
16	1,0 (50)	1,0 (0,5)	-1,0 (40)			
14	1,0 (50)	-1,0 (0,2)	-1,0 (40)			
17	-1,0 (25)	-1,0 (0,2)	1,0 (80)			

**Quadro 1: Planejamento fatorial para os processos de eletrocoagulação.**

Fonte: Statistica 13.

#### 4. 8 ESTUDO CINÉTICO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO

O estudo cinético foi realizado neste trabalho com o intuito de avaliar a cinética do processo de eletrocoagulação da água estudada, através do método de análise integral. Este método, de acordo com Levenspiel (2000), testa uma equação particular de taxa integrando e comparando a curva estimada de C (concentração) versus t (tempo) com os respectivos dados experimentais.

De acordo com Levenspiel (2000), para uma reação unimolecular irreversível de primeira ordem, com volume constante, do tipo  $A \rightarrow \text{produtos}$ , a Equação de taxa (1) deve ser:

$$-r_A = -\frac{dC_A}{dt} = kC_A \quad (1)$$

Após rearranjo e integração, tem-se a Equação (2):

$$-\ln \frac{C_A}{C_{A0}} = kt \quad (2)$$

Onde:  $C_A$  = concentração final do parâmetro turbidez (uT)

$C_{A0}$  = concentração inicial do parâmetro turbidez (uT)

$k$  = constante da velocidade (tempo) ou ( $\text{min}^{-1}$ )

$t$  = tempo (min)

Através da Equação (2), foi feito um gráfico da função logarítmica da concentração em relação ao tempo, desta forma obtido o termo  $k$  que é o coeficiente angular, permitindo a determinação experimental da constante de velocidade da reação.

Os dados para realização do estudo cinético foram coletados de 5 em 5 minutos, onde foram medidos os valores de cor e turbidez, totalizando 16 valores por ensaio.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA COLETADA

Após coletadas, as amostras foram conduzidas para os Laboratórios de Saneamento e de Poluentes Atmosféricos da UTFPR Campus Londrina. Em seguida foram obtidos os valores dos parâmetros cor, turbidez e pH da água bruta, seguindo os métodos descritos no item 4.5 deste trabalho. Os valores encontrados encontram-se na Tabela 2 e o aspecto da água no dia da coleta está representado na Figura 6.

**Tabela 2: Características da amostra coletada.**

Cor Aparente (uH)	Turbidez (uT)	pH
910	384	7,09



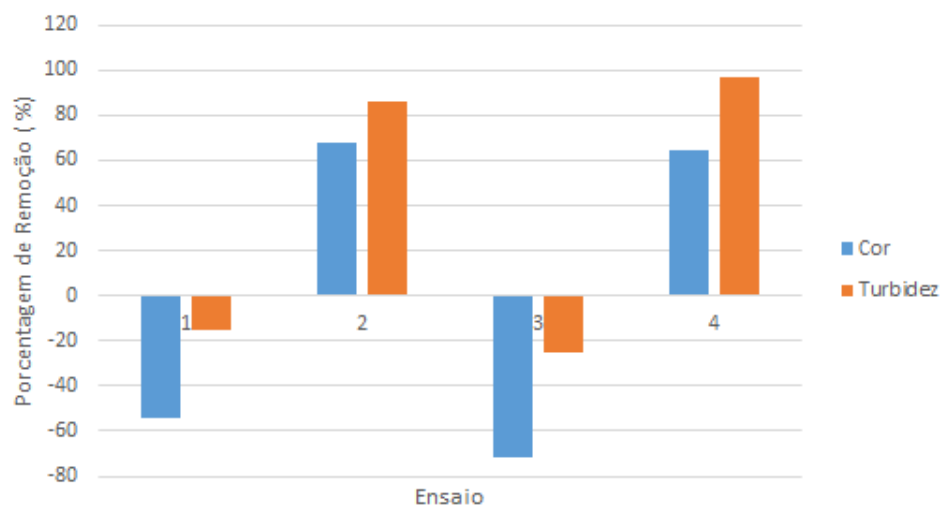
**Figura 6: Aspecto da água no dia da coleta.**  
**Fonte: Autoria Própria (2016)**

## 5. 2 ANÁLISE DA REMOÇÃO DOS PARÂMETROS COR APARENTE E TURBIDEZ DE ACORDO COM OS ENSAIOS

Com a utilização do software Excel da empresa Microsoft, foi possível representar graficamente os resultados obtidos com a realização da eletrocoagulação de acordo com os resultados finais de todos os ensaios realizados para os três processos: Eletrocoagulação somente, eletrocoagulação com adição de coagulante inorgânico cloreto férrico e eletrocoagulação com adição de coagulante orgânico Tanfloc SG. Os valores de todos os resultados obtidos de todos os ensaios realizados encontram-se nas Tabelas A.1, A.2 e A.3 respectivamente do Apêndice A.

### 5. 2. 1 Eletrocoagulação sem uso de Coagulantes

A Figura 7 apresenta os resultados das remoções finais do parâmetro cor aparente e turbidez através da eletrocoagulação sem adição de coagulante, para os ensaios 1, 2, 3 e 4 (Quadro 1 e Tabela A.1) realizados utilizando este processo.



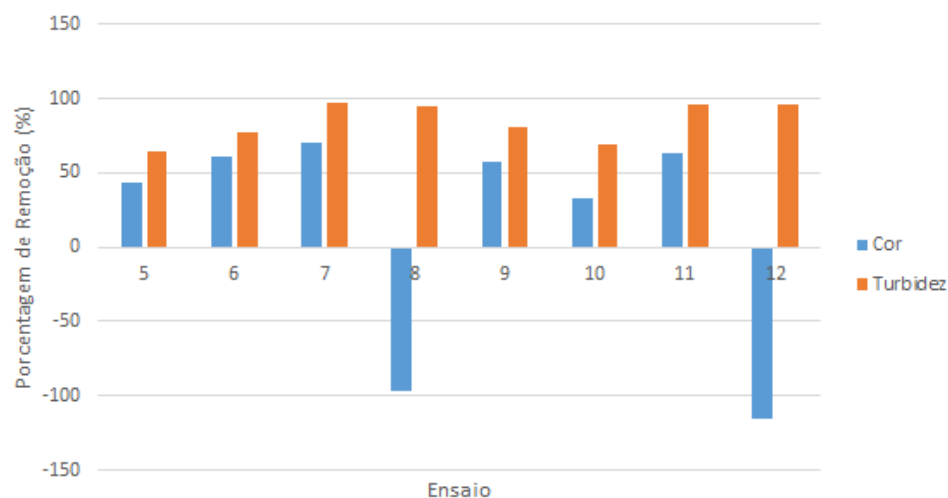
**Figura 7: Remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez através da eletrocoagulação sem adição de coagulantes de acordo com os ensaios realizados.**



Analisando os resultados apresentados pode-se concluir que para a eletrocoagulação sem a adição de coagulantes, o ensaio 4 que corresponde ao uso de 0,5 A de corrente elétrica e 80 minutos de tempo de reação apresenta o melhor resultado de porcentagem de remoção do parâmetro turbidez (96,7%) e o ensaio 2 que corresponde ao uso de 0,5 A de corrente elétrica e 40 minutos de reação apresenta o melhor resultado para a remoção do parâmetro cor (68%). Nos ensaios 1 e 3, nota-se valores negativos para a remoção destes parâmetros, isso significa que o processo aumentou o número de sólidos dissolvidos e suspensos da amostra. A presença de  $Fe^{2+}$  e  $Fe^{3+}$  remanescentes da eletrocoagulação é a possível causa deste fenômeno.

### 5. 2. 2 Eletrocoagulação com adição de Cloreto Férrico

A Figura 8 apresenta os resultados das remoções finais do parâmetro cor aparente e turbidez através da eletrocoagulação com a adição do coagulante inorgânico cloreto férrico, para os oitos ensaios (Quadro 1 e Tabela A.2) realizados utilizando este processo.

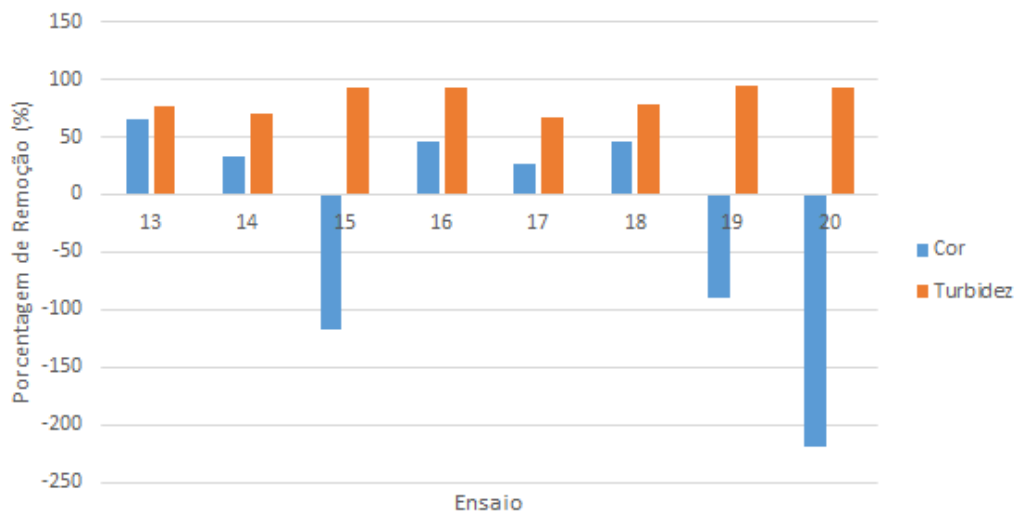


**Figura 8: Remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez através da eletrocoagulação com adição de cloreto férrico de acordo com os ensaios realizados**

De acordo com a Figura 8 conclui-se que para a eletrocoagulação com a adição de cloreto férrico, o ensaio 7; que corresponde ao uso de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  do coagulante,  $0,5 \text{ A}$  de corrente elétrica e 40 minutos de tempo de reação; apresenta os melhores resultados para a remoção dos parâmetros turbidez (96,8%) e cor aparente (70,3%). Observa-se valores negativos para a remoção do parâmetro cor aparente nos ensaios 8 e 12, que foram os ensaios utilizando  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  de coagulante inorgânico e  $0,5 \text{ A}$  de corrente elétrica. A maior disponibilidade de íons na solução, combinada com a maior liberação de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  pela utilização de maior corrente nos eletrodos de ferro devem ser os responsáveis pelo aumento dos sólidos dissolvidos da amostra, ocasionando desta forma, um aumento no parâmetro cor aparente.

### 5. 2. 3 Eletrocoagulação com adição de Tanfloc SG

A Figura 9 apresenta os valores das remoções finais do parâmetro cor aparente e Turbidez através da eletrocoagulação com a adição do coagulante orgânico Tanfloc SG para os oito ensaios (Quadro 1 e Tabela A.3) realizados utilizando este processo.

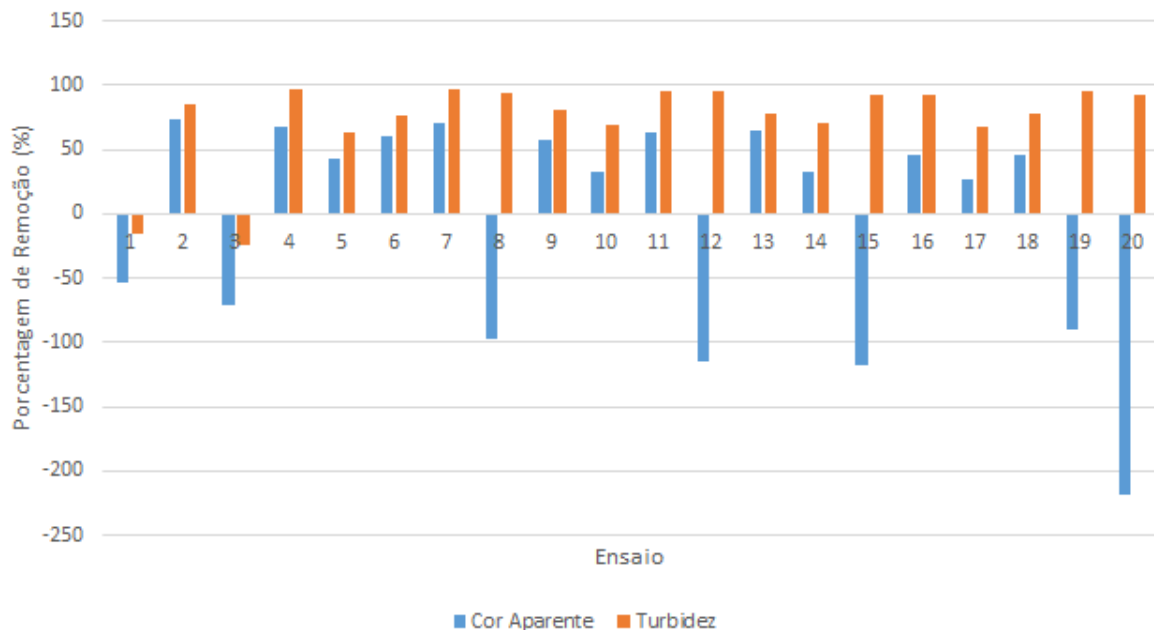


**Figura 9: Remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez através da eletrocoagulação com adição de Tanfloc SG de acordo com os ensaios realizados.**

De acordo com a Figura 9 conclui-se que para a eletrocoagulação com a adição de Tanfloc SG, o ensaio 19; que corresponde ao uso de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  do coagulante, 0,5 A de corrente elétrica e 80 minutos de processo apresenta o melhor resultado para a remoção do parâmetro turbidez (95,1%). O ensaio 13; que corresponde ao uso de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  do coagulante, 0,2 A de corrente elétrica e 40 minutos de tempo de reação; apresenta os melhores resultados para a remoção do parâmetro cor (65,5%). Observam-se valores negativos para a remoção do parâmetro cor aparente nos ensaios 15, 19 e 20; nestes ensaios a corrente elétrica utilizada foi de 0,5 A. A maior liberação de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  pela utilização de maior corrente nos eletrodos de ferro devem ser os responsáveis pelo aumento dos sólidos dissolvidos da amostra, ocasionando desta forma, um aumento no parâmetro cor aparente.

#### 5. 2. 4 Análise Conjunta de todos os ensaios

A Figura 10 apresenta os valores das remoções finais dos parâmetros cor aparente e turbidez de todos os vinte ensaios (Quadro 1 e Tabelas A.1, A.2 e A.3) realizados utilizando o processo de eletrocoagulação.



**Figura 10: Remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez através da eletrocoagulação de acordo com os ensaios realizados.**

Analisando a Figura 10, conclui-se que dentre todos os ensaios de eletrocoagulação realizados (com e sem o uso de agentes coagulantes), o ensaio 7, no qual foram utilizados  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  de cloreto férrico, 0,5 A de corrente elétrica e 40 minutos de processo; foi o que mais se destacou, com uma remoção do parâmetro cor aparente de 70,33% e remoção do parâmetro turbidez de 96,77%.

Observa-se também um bom resultado para o ensaio 2, principalmente para a remoção do parâmetro cor aparente que foi de 73,19%, porém para o parâmetro turbidez foi 85,94%. Neste ensaio foram utilizados 0,5 A de corrente elétrica e 40 minutos de reação, sem a adição de agente coagulante.

### 5.3 AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS COR APARENTE E TURBIDEZ EM RELAÇÃO AO TEMPO

Novamente utilizando-se o software Excel da empresa Microsoft, foi possível representar graficamente os resultados obtidos com a realização da eletrocoagulação

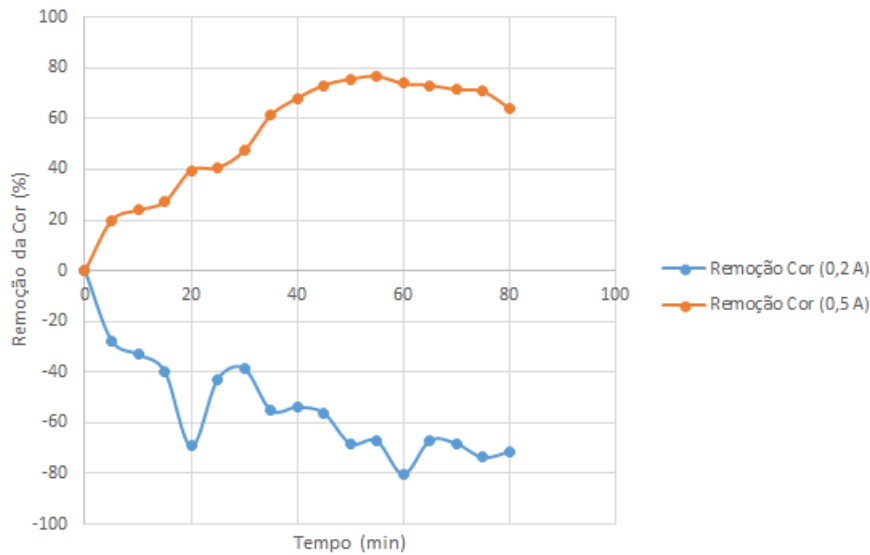
do ponto de vista da remoção dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com suas respectivas porcentagens de remoção pelo tempo de processo. Neste Item pode-se observar os valores das remoções dos parâmetros cor e turbidez de 5 em 5 minutos, e desta forma avaliar o comportamento e eficiência destas remoções durante todo o processo de eletrocoagulação. As Tabelas B.1, B.2, B.3, B.4, B.5, B.6, B.7, B.8, B.9 e B.10 contendo todos os dados podem ser vistas no Apêndice B.

### 5. 3. 1 Remoção de Cor Aparente

Para a remoção da cor aparente três situações foram analisadas, a eletrocoagulação somente, a eletrocoagulação com a utilização de cloreto férrico e a eletrocoagulação com a utilização de tanfloc SG.

#### 5. 3. 1. 1 Remoção de Cor Aparente através da Eletrocoagulação

A Figura 11 apresenta os resultados das remoções do parâmetro cor aparente, de acordo com as Tabelas B.1 e B.2 do Apêndice B, através da eletrocoagulação sem adição de coagulante, com a corrente elétrica de 0,2 A e 0,5 A. Os dados foram obtidos através dos ensaios 3 e 4.

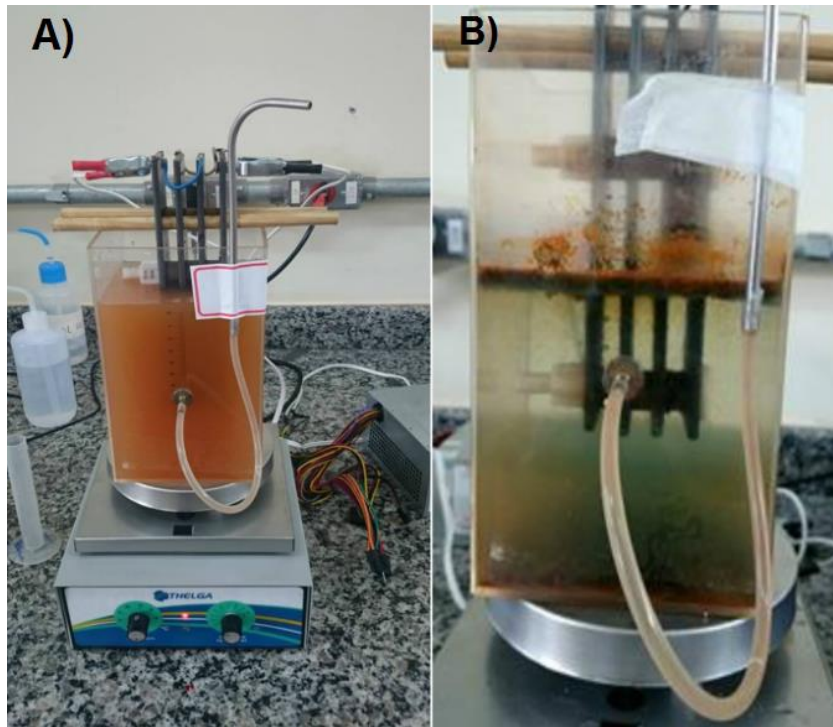


**Figura 11: Remoção do parâmetro cor aparente através da eletrocoagulação sem adição de coagulantes com corrente elétrica de 0,2 A e 0,5 A.**

Analisando os resultados apresentados pode-se concluir que a eletrocoagulação sem a adição de coagulantes a 0,2 A não é efetiva para a remoção do parâmetro cor aparente da água. Na Figura 11 pode-se observar valores negativos para a remoção do parâmetro cor aparente, significando que o processo acabou aumentando concentração dos sólidos dissolvidos (cor aparente) da amostra, pois a corrente elétrica utilizada não foi suficiente para que o processo de eletrocoagulação ocorresse de maneira adequada, além da liberação de ferro dos eletrodos, que também auxiliou no aumento dos valores da cor aparente da amostra.

Com a adição de  $250 \text{ mg.L}^{-1}$  de sal na amostra, o valor da corrente elétrica aumentou para 0,5 A e desta forma, como pode ser observado na Figura 11, uma boa eficiência na remoção de cor da água foi obtida. O melhor resultado foi observado aos 55 minutos do processo, onde foi alcançado 76,7 % de remoção de cor da água bruta, resultando em 202 uH de cor aparente. Como já esperado, o valor obtido não atendeu ao VMP pela Portaria nº 2914/11, e pelo CONAMA 357/05 para corpos d'água classe 2; para alcançar esse valor provavelmente a amostra deveria passar por um processo de filtração após a eletrocoagulação.

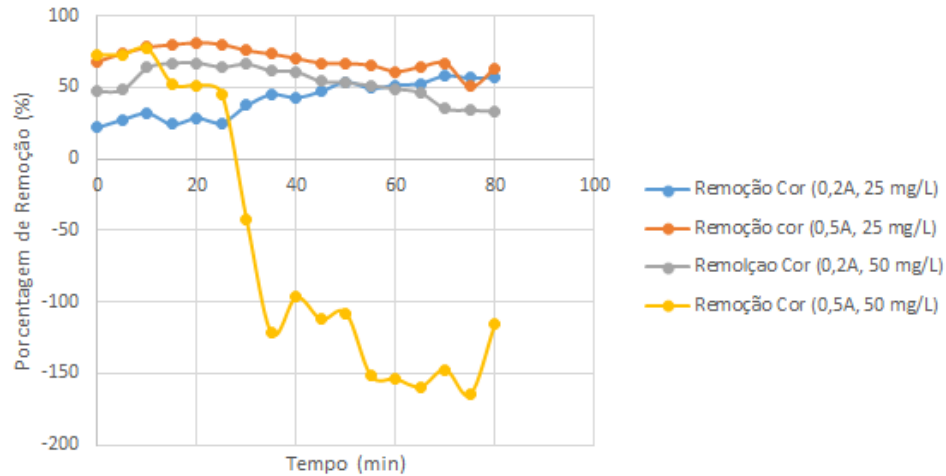
A Figura 12 mostra a comparação entre o aspecto da água ao fim do processo utilizando 0,2 A e 0,5 A de corrente elétrica respectivamente.



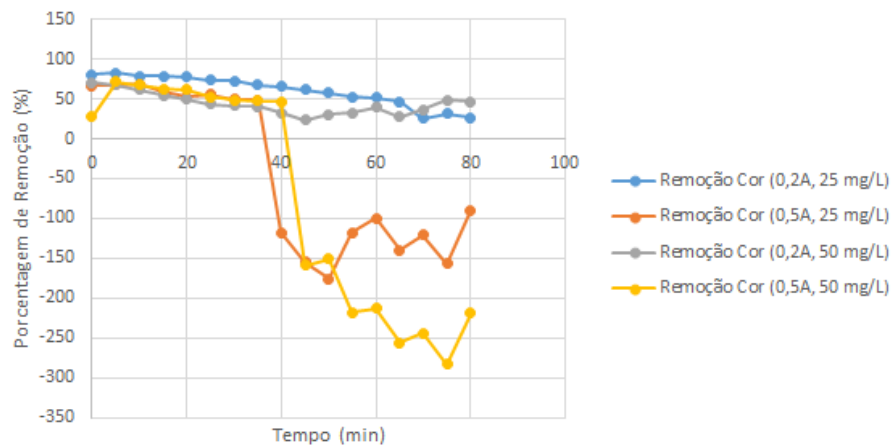
**Figura 12: Aspecto final (80 min) da água após eletrocoagulação. Sendo que: A) para 0,2 A de corrente elétrica; B) para 0,5 A de corrente elétrica.**  
 Fonte: Autoria própria (2016).

### 5. 3. 1. 2 Remoção da Cor Aparente através da Eletrocoagulação e Adição de Coagulantes Orgânico e Inorgânico

A Figuras 13 e 14 apresentam, de acordo com as Tabelas B.3, B.4, B.5, B.6, B.7, B.8, B.9 e B.10 do Apêndice B, os resultados das remoções do parâmetro cor aparente através da eletrocoagulação com a adição de cloreto férrico e eletrocoagulação com adição de Tanfloc SG, respectivamente, a uma concentração de 25 e 50 mg.L<sup>-1</sup>, e corrente elétrica de 0,2 A e 0,5 A. Os dados foram obtidos através dos ensaios 9,10,11,12,17,18,19 e 20 (Quadro 1).



**Figura 13: Remoção do parâmetro cor aparente através da eletrocoagulação e adição de cloreto férrico.**



**Figura 14: Remoção do parâmetro cor aparente através da eletrocoagulação e adição de Tanfloc SG.**

Para a utilização de cloreto férrico (Figura 13), o melhor resultado para a remoção de cor aparente (81,3%) foi alcançado utilizando 0,5 A de corrente elétrica e  $25 \text{ mgL}^{-1}$  de concentração, aos 20 minutos de processo. O valor obtido de  $170 \text{ uH}$  também não atendeu a Portaria nº 2914/11 e ao CONAMA 357/05.



Observando a Figura 14, pode-se concluir que aos 5 minutos de processo a maior remoção de cor (82,3%) utilizando a eletrocoagulação em conjunto com o Tanfloc SG foi alcançada, com a concentração de 25 mg.L<sup>-1</sup> e 0,2 A de corrente elétrica. O valor de 161 uH obtido não atendeu ao VMP pela Portaria nº 2914/11, e pelo CONAMA 357/05.

Em seu trabalho utilizando o método de Jar Test para o processo de coagulação/floculação/sedimentação para analisar o tratamento da água com a adição de Tanfloc SG, Trevisan (2013) obteve o melhor resultado para a remoção de cor aparente (98,68%) com a concentração de 25 mg.L<sup>-1</sup> após 30 minutos de sedimentação, para uma água contendo 948 uH de cor inicial. Visto que no presente trabalho as coletas começaram a ser realizadas após 18 minutos da adição do coagulante, e que após coletadas as amostras eram deixadas em repouso por aproximadamente 5 minutos antes de serem feitas as leituras, pode-se concluir que o resultado ótimo foi atingido com 28 minutos de sedimentação.

Trevisan (2013), observou em seu trabalho um melhor resultado (98,42%) aos 30 minutos de sedimentação, e 25 mg.L<sup>-1</sup> de cloreto férrico

Segundo Libânio (1997) para uma água com cor inicial de aproximadamente 200 uH, uma remoção ótima de cor aparente (97%) foi alcançada com uma concentração de cloreto férrico entre 20 e 24 mg.L<sup>-1</sup>.

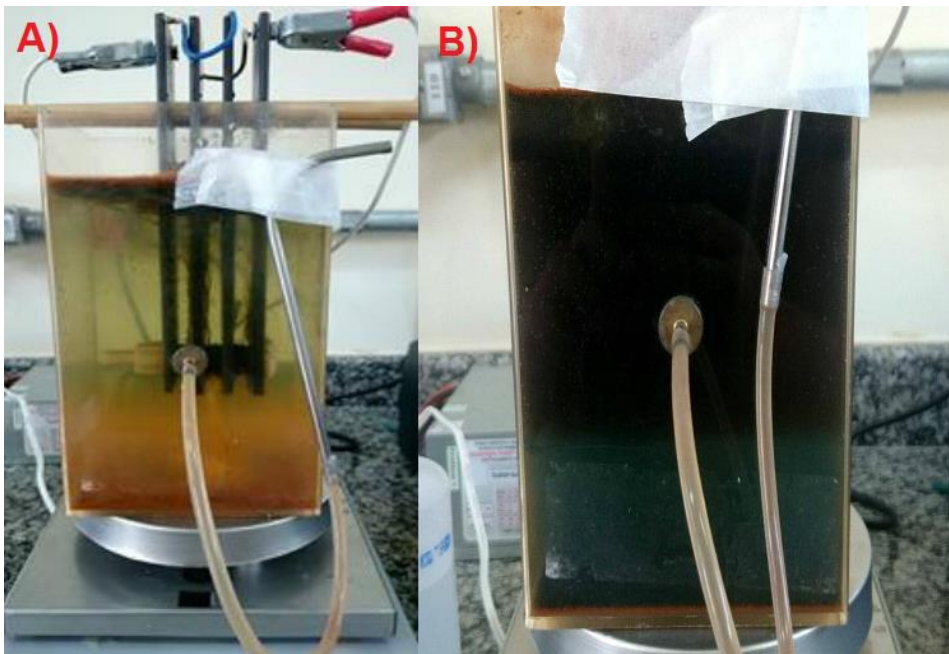
Como já comentado, a presença de elevada de Fe<sup>2+</sup> e Fe<sup>3+</sup> remanescente podem aumentar os valores do parâmetro cor aparente da amostra. Nas Figuras 13 e 14 pode-se notar, além dos valores da concentração e corrente utilizado, com quanto tempo de processo este fenômeno começou a ocorrer.

No caso da eletrocoagulação utilizando coagulante inorgânico, o aumento dos sólidos dissolvidos em relação ao valor inicial se deu a partir dos 30 minutos de reação para o processo de maior concentração e corrente elétrica. Isso explica os valores negativos para a porcentagem de remoção de cor aparente para os ensaios 8 e 12 no item 5. 2. 2, pois ambos tiveram duração de 40 e 80 minutos respectivamente.

Para o experimento utilizando coagulante inorgânico os valores negativos ocorreram para os ensaios com maior corrente elétrica (0,5 A) a partir dos 40 minutos para a concentração de 25 mg.L<sup>-1</sup>, e a partir dos 45 para concentração de 50 mg.L<sup>-1</sup>.

Desta forma, confirma-se a relevância de analisar o comportamento das remoções durante o tempo do experimento, pois, por exemplo, de acordo com a Figura 10 do item 5. 2. 3 ao analisar os resultados finais dos ensaios, concluiu-se que o ensaio 15 não realizava a remoção de cor aparente da amostra, sendo que na verdade a remoção ocorreu até os 35 minutos do processo.

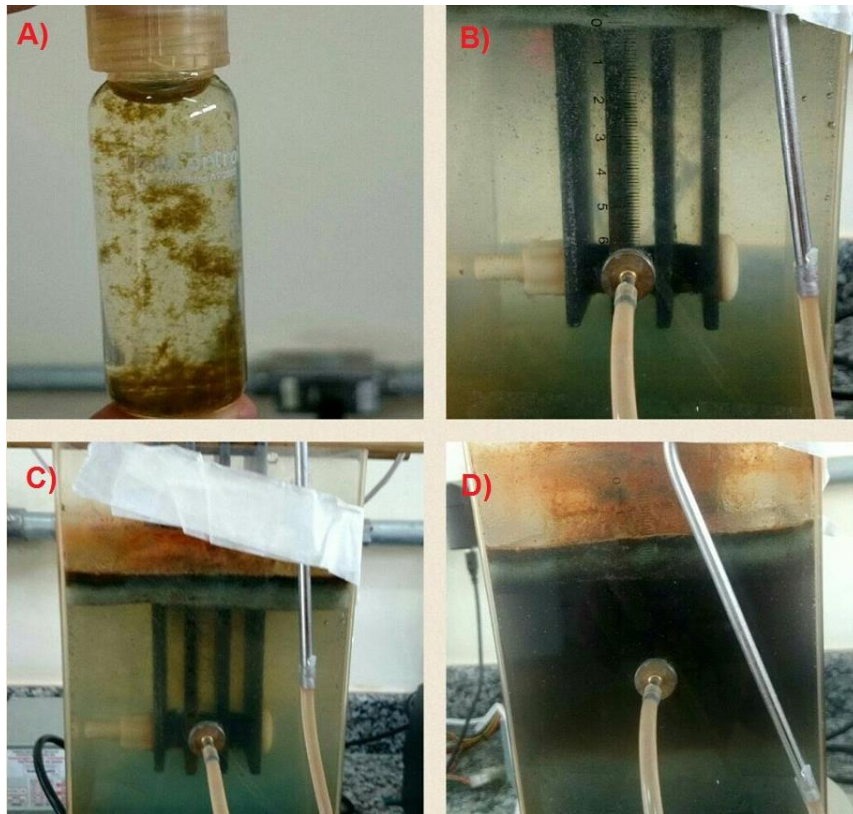
A Figura 15 mostra um comparativo entre os 20 min e o momento final (80 min), da amostra com muito resíduo de ferro, para o experimento utilizando coagulante inorgânico com concentração de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  e  $0,5 \text{ A}$  de corrente elétrica.



**Figura 15:** Amostra com  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  de cloreto férrico e  $0,5 \text{ A}$  de corrente. Sendo que: A) aos 20 minutos de processo; B) 80 minutos do processo.

Fonte: Autoria Própria (2016).

A Figura 16, na região superior, mostra uma amostra que foi utilizada para a medição do parâmetro cor aos 5 minutos de eletrocoagulação e o aspecto da água neste momento; na parte inferior encontra-se o aspecto da água aos 40 minutos já mais escurecida e o aspecto ao final do processo utilizando coagulante orgânico, com concentração de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$  e corrente de  $0,5 \text{ A}$ .



**Figura 16:** Aspecto da água no experimento com coagulante orgânico. Sendo que: A) amostra no frasco para medição de cor aparente; B) aspecto da água aos 5 minutos; C) aspecto aos 40 minutos; D) aspecto aos 80 minutos do experimento.

Fonte: Autoria Própria (2016).

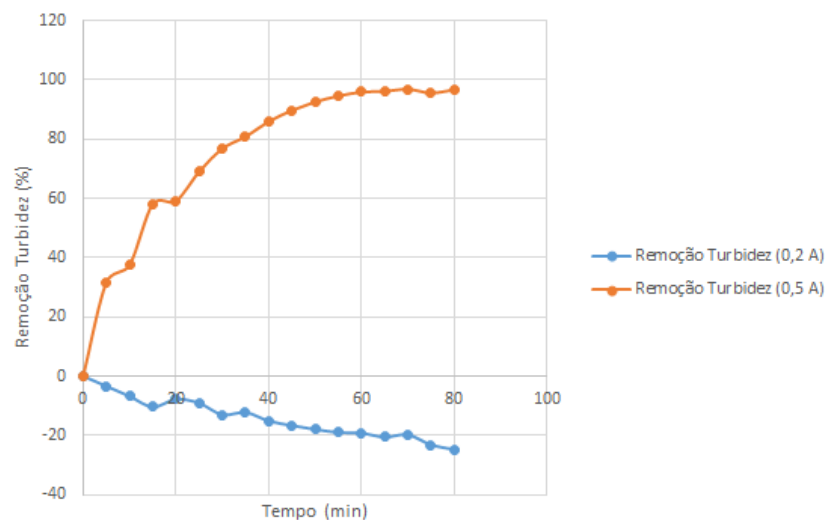
É importante ressaltar que com o fato da maior remoção do parâmetro cor para a utilização do coagulante orgânico ter sido encontrado já nas primeiras medições, exista a possibilidade de o tempo ótimo para a eletrocoagulação combinada com o uso de Tanfloc SG, com essa concentração e corrente elétrica, possa estar dentro destes 18 minutos iniciais onde não foram realizadas medições dos parâmetros analisados.

### 5. 3. 2 Remoção de Turbidez

Assim como para o parâmetro cor aparente, para a remoção da turbidez três situações foram analisadas, a eletrocoagulação somente, a eletrocoagulação com a utilização de cloreto férrico e a eletrocoagulação com a utilização de Tanfloc SG.

### 5. 3. 2. 1 Remoção de Turbidez através da Eletrocoagulação

A Figura 17 apresenta os resultados das remoções do parâmetro turbidez, de acordo com as Tabelas B.1 e B.2 do Apêndice B, através da eletrocoagulação sem adição de coagulante, com a corrente elétrica de 0,2 A e 0,5 A. Os dados foram obtidos através dos ensaios 3 e 4.



**Figura 17: Remoção do parâmetro turbidez através da eletrocoagulação com corrente elétrica de 0,2 A e 0,5 A.**

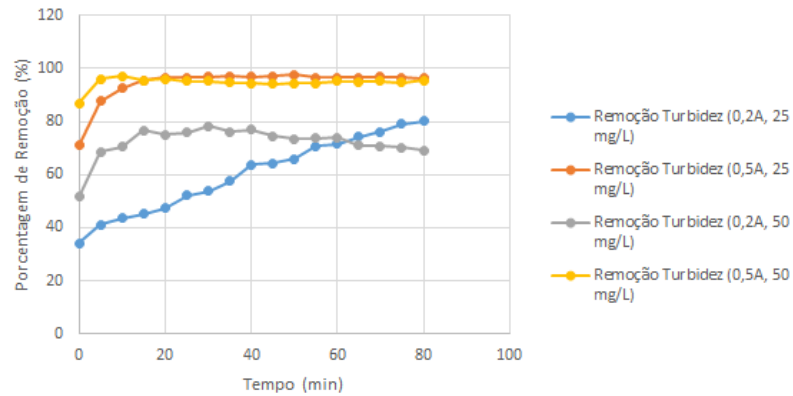
De acordo com a Figura 17, conclui-se que a eletrocoagulação sem a adição de agente coagulante e com a utilização de 0,2 A de corrente elétrica não é efetiva para a remoção do parâmetro turbidez da água utilizada neste trabalho. Nota-se valores negativos para a remoção deste parâmetro, da mesma forma em que ocorreu com o parâmetro cor aparente, significando que o processo acabou aumentando a turbidez (sólidos suspensos) da amostra, pois a corrente elétrica utilizada não foi suficiente para que o processo de eletrocoagulação ocorresse de maneira adequada, além da liberação de ferro dos eletrodos, contribuindo para o aumento dos valores da turbidez da amostra.

Adicionando 250 mg.L<sup>-1</sup> de sal na amostra, e atingindo 0,5 A de corrente elétrica, uma boa eficiência na remoção do parâmetro turbidez da água foi obtida, como pode ser observado na Figura 17. O melhor resultado foi observado aos 70 minutos do processo, onde foi alcançado 96,9 % de remoção de turbidez da água bruta. O valor obtido de 11,9 uT atende a resolução do CONAMA 357/05 para cursos d'água de classe 2, porém não atende a portaria de potabilidade nº 2914/11.

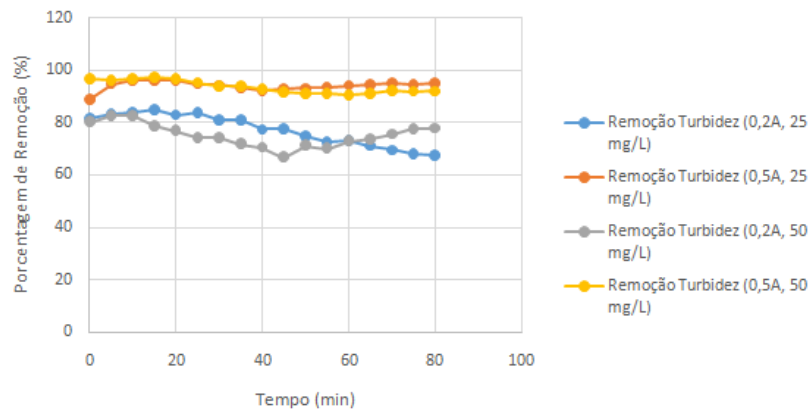
Adapureddy (2012) aplicou o processo de eletrocoagulação para a remoção de turbidez para água potável, utilizando eletrodos de aço. Para uma turbidez inicial de 500 uT e usando uma voltagem de 25 V foi alcançada uma remoção de 99% do parâmetro turbidez.

### 5. 3. 2. 2 Remoção da Turbidez através da Eletrocoagulação e Adição de Coagulantes Orgânico e Inorgânico

As Figura 18 e 19 apresentam os resultados das remoções do parâmetro turbidez, de acordo com as Tabelas B.3, B.4, B.5, B.6, B.7, B.8, B.9 e B.10 do Apêndice B, através da eletrocoagulação com a adição de cloreto férrico a uma concentração de 25 e 50 mg.L<sup>-1</sup> respectivamente, e corrente elétrica de 0,2 e 0,5 A. Os dados foram obtidos através dos ensaios 9,10,11,12,17,18,19 e 20.



**Figura 18: Remoção do parâmetro turbidez através da eletrocoagulação e adição cloreto férrico.**



**Figura 19: Remoção do parâmetro turbidez através da eletrocoagulação e adição de Tanfloc SG.**

Analisando a Figura 18, conclui-se que para o uso do coagulante inorgânico, o melhor resultado, de 8,9 uT (97,68%), foi alcançado aos 50 minutos do processo utilizando 25 mg.L<sup>-1</sup> de cloreto férrico e 0,5 A de corrente elétrica.

De acordo com a Figura 19, observa-se que aos 15 minutos do processo a maior remoção de turbidez (97,34%) foi atingida com 50 mg.L<sup>-1</sup> de Tanfloc SG e 0,5 A de corrente elétrica, com um valor de turbidez de 10,2 uT. Um valor bem próximo a esse (96,43%) também foi observado utilizando-se 25 mg.L<sup>-1</sup> de concentração do coagulante, no mesmo tempo e com a mesma corrente.

Assim como para o parâmetro cor aparente, não se esperava que o valores obtidos para a turbidez atendessem o VMP pela portaria nº 2914/11, uma vez que os processos analisados não contam com nenhum tipo de filtração. Entretanto, os valores alcançados atendem a resolução do CONAMA 357/05 que estabelecem quais devem ser os padrões de lançamento de efluentes nos corpos d'água segundo sua classificação.

Trevisan (2013), para uma turbidez inicial de 377 uT, obteve o melhor resultado (99,46%) aos 30 minutos de reação, com concentração de 25 mg.L<sup>-1</sup> de Tanfloc SG, porém ao utilizar 45 mg.L<sup>-1</sup> valores bem próximos ao ótimo foram também alcançados. Para o cloreto férrico, 99,20% de remoção do parâmetro turbidez foi alcançado aos 20 minutos, utilizando 25 mg.L<sup>-1</sup> do coagulante.

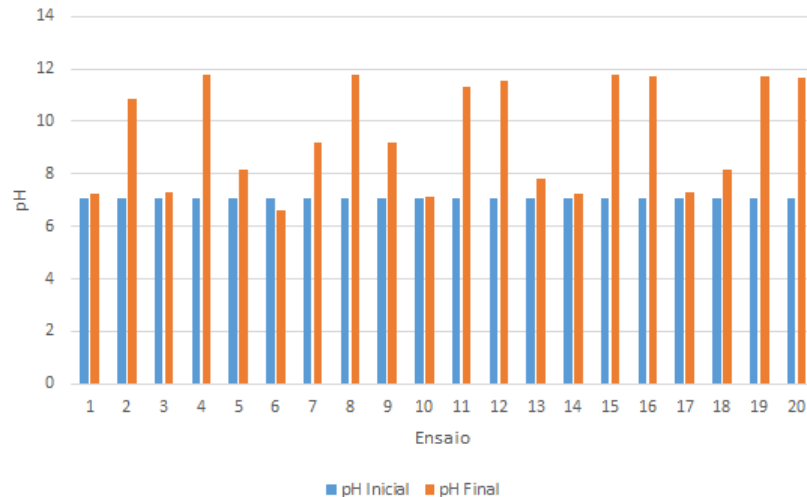
Baghavnd *et al.* (2010), observou que para uma turbidez inicial elevada (500 uT), a maior remoção de turbidez foi notada ao utilizar concentração entre 20 e 30 mg.L<sup>-1</sup> de cloreto férrico, o mesmo autor afirma que grandes concentrações deste coagulante podem causar um “dosagem excessiva “ que acaba atrapalhando o processo de coagulação.

Ressalta-se ainda que para uma turbidez inicial de 370 uT semelhante àquela no dia em que a amostra foi coletada (340 uT), a remoção de turbidez da água logo antes a entrada dos filtros da ETA da SAMAE de Ibiporã, foi de 95,1%. O agente coagulante utilizado nesta empresa é o sulfato de alumínio, porém com os valores de remoção de turbidez alcançados neste trabalho, pode-se concluir que após a processo de filtração, provavelmente os parâmetros para se atender a Portaria de potabilidade seriam alcançados.

#### 5. 4 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO pH

Utilizando a metodologia citada no item 4. 5 mediu-se o pH inicial para a água bruta e o pH resultante de todos os ensaios (Quadro 1 e Tabelas A.1, A.2 e A.3), para

todos os processos. A variação do pH para cada ensaio pode ser observada na Figura 20.



**Figura 20: Gráfico da variação do pH do processo de eletrocoagulação para cada ensaio.**

Analisando a Figura 20, nota-se um aumento significativo no pH para os ensaios que utilizaram corrente elétrica de 0,5 A. Como o cloreto de sódio não apresenta propriedades ácidas nem alcalinas, sua adição não deve ter causado influencia expressiva para esse aumento. Uma explicação para um maior valor do pH final é a amplificação da corrente elétrica fornecida aos eletrodos de ferro.

Com uma maior corrente elétrica, segundo Crespilho e Rezende (2004), espera-se um maior liberação de  $Fe^{3+}$  e desta forma a maior formação de  $Fe(OH)_x$ .

Com exceção do ensaio 7, que obteve um valor final do pH de 9,21, todos os ensaios em que foram utilizados 0,5 A de corrente elétrica obtiveram um pH maior que 9,5, não atendendo a portaria nº 2914/11. Os demais ensaios atenderem o intervalo de pH de 6 a 9,5 previsto para o padrão de potabilidade da água.

Para resolução do CONAMA 430/11, todos os ensaios em que foram utilizados 0,5 A de corrente elétrica não atenderam o intervalo para o pH de lançamento em rios de classe 2. Os demais ensaios, com exceção do ensaio 9 que obteve pH final de 9,17; atenderam o intervalo de pH de 5 a 9 previsto na resolução.



Em seu trabalho, aplicando eletrocoagulação com eletrodos de aço para a remoção de turbidez para água potável, Adapureddy (2012) notou que para todos os valores de pH iniciais utilizados resultaram em valores de pH finais entre 7 e 8, concluindo que o processo tende a neutralizar o pH da amostra.

Coral (2009), observou que utilizando o coagulante orgânico Tanfloc SG para o tratamento de água, não houve alteração significativa do pH .

Desta forma, conclui-se que o responsável pelos aumentos do pH dos ensaios onde foram adicionados  $250 \text{ mg.L}^{-1}$  de sal foi de fato, o excesso de  $\text{Fe}^{3+}$ .

## 5. 5 ANÁLISE CONFORME O PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Utilizando o software Statistica 13, da fabricante Dell, foi possível aplicar a análise fatorial, de acordo com planejamento experimental do trabalho. Desta forma realizou-se uma análise multivariável mais precisa. Diferente da subseção 5.3, neste item os resultados serão abordados por meio de cada processo (Eletrocoagulação somente, eletrocoagulação com adição de cloreto férrico e eletrocoagulação com adição de Tanfloc SG), de acordo com o Quadro 1 e com as Tabelas A.1, A.2 e A.3 do Apêndice A.

### 5. 5. 1 Eletrocoagulação

Nas Figuras 21, 22 e 23 encontram-se os resultados para a Eletrocoagulação sem adição de agente coagulante.

Factor	Refressn Coeff.	Std.Err	t(1)	p	-90,% Cnf.Limt	+90,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	9,28750	0,227500	40,82418	0,015591	7,85112	10,72388
(1) Corrente	-2,02250	0,227500	-8,89011	0,071310	-3,45888	-0,58612
(2) Concentração	0,24250	0,227500	1,06593	0,479689	-1,19388	1,67888

Figura 21: Teste de significância para a eletrocoagulação sem adição de coagulante.  
Fonte: Statistica 13.

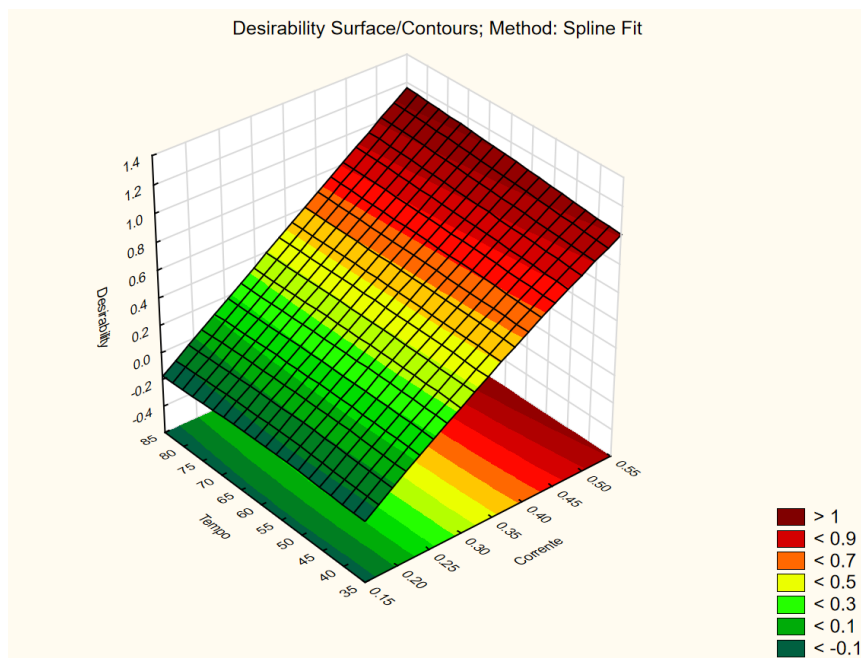
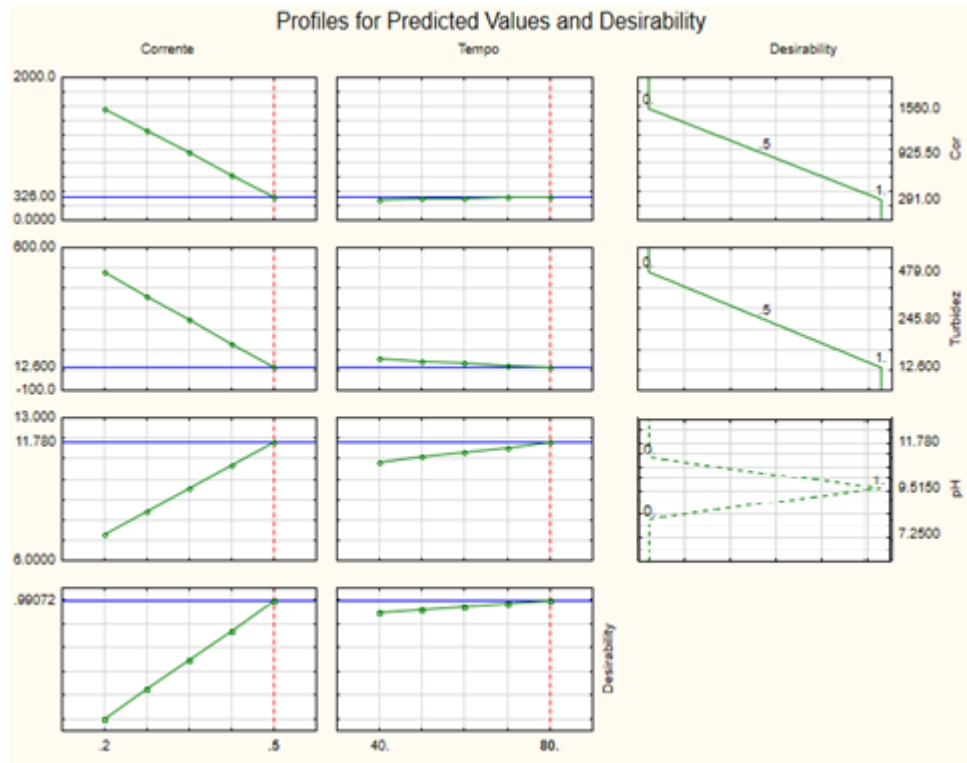


Figura 22: Gráfico de superfície de resposta para a eletrocoagulação sem a presença de agente coagulante.  
Fonte: Statistica 13.



**Figura 23: Gráficos de variáveis independentes e sua interação com os parâmetros cor aparente, turbidez e pH; para a eletrocoagulação sem a presença de agente coagulante.**  
**Fonte: Statistica 13.**

Na Figura 21 pode-se analisar o teste estático de significância, que analisa a significância (em um nível de 10%) das variáveis independentes assim como as interações entre si. A variável determinante “p” encontrada na tabela deve ser menor que 0,10 para que a variável independente ou a interação entre 2 variáveis independentes seja significativa.

De acordo com a Figura 21, o valor de p inferior a 0,10 foi encontrado para a variável corrente elétrica.

Na Figura 22, tem-se o gráfico de superfície de resposta, que mostra a interação entre as variáveis independentes nos eixos X e Y, e no eixo Z a “desirability” que traduzido ao pé da letra para o português significaria “grau de desejo”, ou seja mostra como a interação entre essas duas variáveis influenciam a obtenção dos resultados desejados, por exemplo Cor Aparente e Turbidez baixa e pH neutro. Analisando a superfície pode-se concluir que o tempo não estabelece influencia

significante para a obtenção dos resultados desejados, entretanto o valor da desirability se eleva com o aumento da corrente elétrica.

A Figura 22, representa os gráficos de valores desejados para cada variável independente. O valor desejado para a corrente elétrica foi 0,5 A e para o tempo foi de 80 minutos. De acordo com a Figura 7 do item 5. 2. 1, o ensaio que corresponde ao uso de 0,5 A de corrente elétrica para o tempo de 80 minutos foi o ensaio 4, que pode ser considerado o melhor ensaio para o processo de eletrocoagulação sem adição de coagulante, uma vez que este ensaio apresenta a maior remoção de turbidez com um valor de 96,7% e o segundo maior valor de remoção do parâmetro cor aparente com um valor de 64,2%. O ensaio 2, originou uma remoção do parâmetro cor aparente razoavelmente maior (68%), porém a diferença na remoção do parâmetro turbidez (85,9%) foi significativa, fazendo com que o ensaio 4 seja considerado o melhor ensaio para esse processo e confirmando assim os valores de corrente elétrica e tempo encontrados na Figura 18 do item 5. 5. 1, para resultar a obtenção dos resultados desejados.

#### 5. 5. 2 Eletrocoagulação com adição de Cloreto Férrico

Nas Figuras 24, 25 e 26 encontram-se os resultados para a Eletrocoagulação com adição de agente coagulante inorgânico.

Factor	Repressn Coeff.	Std.Err	t(1)	p	-90,% Cnf.Limt	+90,% Cnf.Limt	Coeff.
Mean/Interc	778,2500	34,2500	22,72263	0,027999	562,004	994,496	778,2500
(1) Concentração	800,5000	68,50000	11,68613	0,054344	368,008	1232,992	400,2500
(2) Corrente	619,500	68,50000	9,04380	0,070108	187,008	1051,992	309,7500
(3) Tempo	88,5000	68,50000	1,29197	0,419336	-343,992	520,992	44,2500
1 by 2	773,5000	68,50000	11,29197	0,056231	341,008	1205,992	386,7500
1 by 3	122,5000	68,50000	1,78832	0,324591	-309,992	554,992	61,2500
2 by 3	27,5000	68,50000	0,40146	0,756961	-404,992	459,992	13,7500

Figura 24: Teste de significância para a eletrocoagulação com coagulante inorgânico.  
Fonte: Statistica 13.

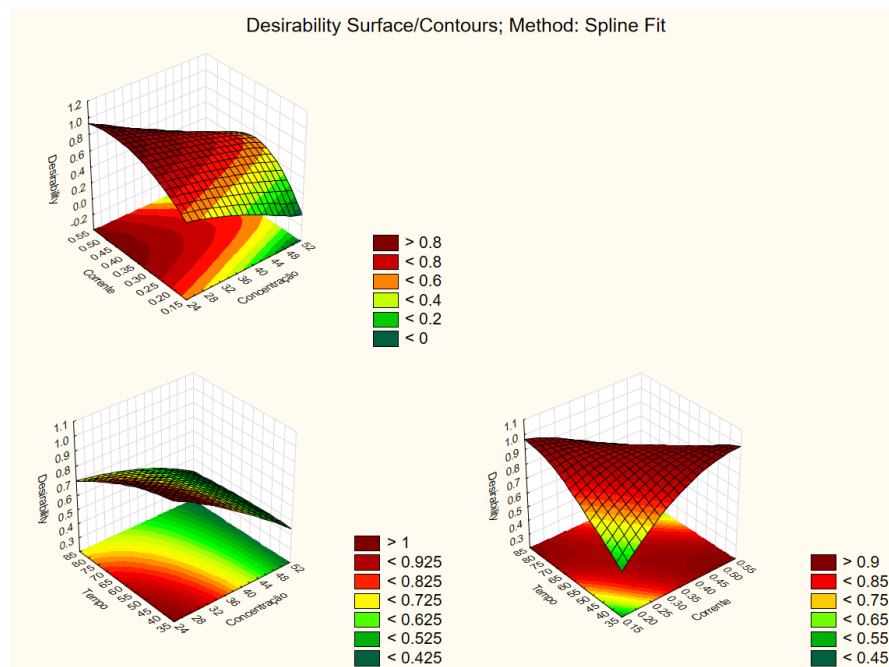
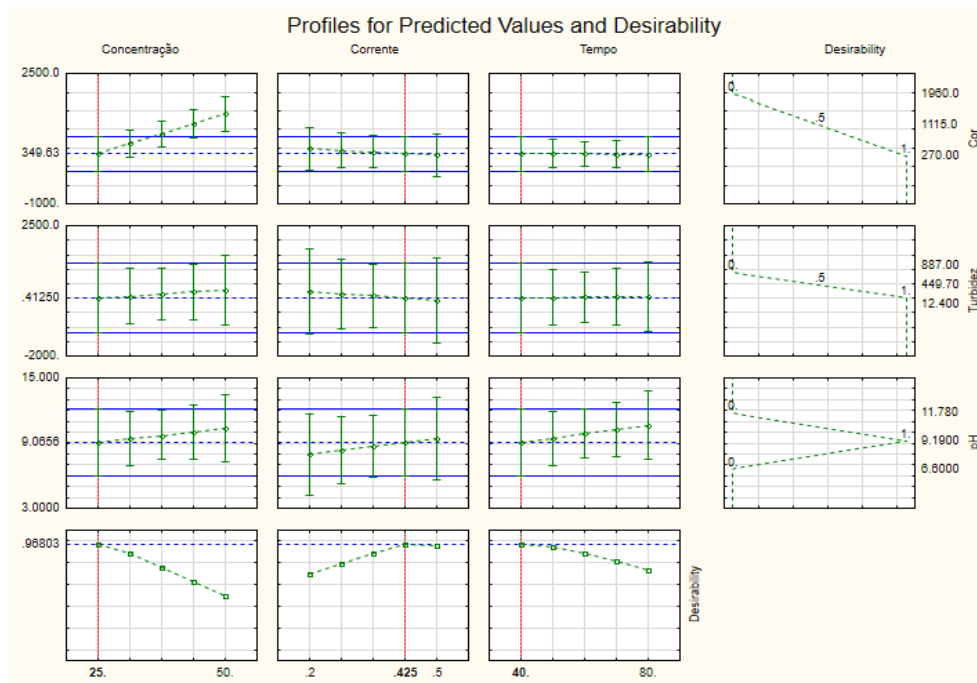


Figura 25: Gráfico de superfície de resposta para a eletrocoagulação com adição de coagulante inorgânico.

Fonte: Statistica 13.



**Figura 26: Gráficos de variáveis independentes e sua interação com os parâmetros cor aparente, turbidez e pH; para a eletrocoagulação com adição de coagulante inorgânico.**  
**Fonte: Statistica 13.**

Na Figura 24 pode-se observar que valores de  $p$  inferiores de 0,10 foram encontrados para a variável concentração e corrente, assim como para a interação entre estas.

Desta forma, somente o gráfico de superfície de resposta entre a concentração e a corrente elétrica é relevante para ser analisado na Figura 25. No gráfico da Figura 25, observa-se que a desirability aumenta com valores maiores de corrente elétrica e valores menores de concentração.

Analisando a Figura 26, conclui-se que, para a eletrocoagulação com adição de coagulante inorgânico, o valor desejado para a concentração é de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$ , para a corrente elétrica é de  $0,425 \text{ A}$  e para o tempo é de 40 minutos.

De acordo com a Figura 8 do item 5. 2. 2, para a eletrocoagulação com a adição de cloreto férrico, o ensaio 7; que corresponde ao uso de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  do coagulante,  $0,5 \text{ A}$  de corrente elétrica e 40 minutos de tempo de reação; apresenta os melhores resultados para a remoção dos parâmetros turbidez (96,8%) e cor aparente

(70,3%). Concluindo que os valores de concentração, corrente elétrica e tempo obtidos pela análise estatística são os melhores para alcançar os resultados desejados.

### 5. 5. 3 Eletrocoagulação com adição de Tanfloc SG

Nas Figuras 27, 28 e 29 encontram-se os resultados para a Eletrocoagulação com adição de agente coagulante orgânico.

Factor	Refressn Coeff.	Std.Err	t(1)	p	-90,% Cnf.Limt	+90,% Cnf.Limt
Mean/Interc	11,47,875	392,1250	2,927319	0,209563	-1327,90	3623,655
(1) Concentração	-51,250	784,2500	-0,065349	0,958457	-5002,81	4900,310
(2) Corrente	1253,750	784,2500	1,598661	0,355855	-3697,81	6205,310
(3) Tempo	599,250	784,2500	0,764106	0,584626	-4352,31	5550,810
1 by 2	-109,250	784,2500	-0,139305	0,911883	-5060,81	4842,310
1 by 3	546,250	784,2500	0,696525	0,612687	-4405,31	5497,810
2 by 3	481,250	784,2500	0,613644	0,649610	-4470,31	5432,810

**Figura 27: Teste de significância para a eletrocoagulação com coagulante orgânico.**

Fonte: Statistica 13.

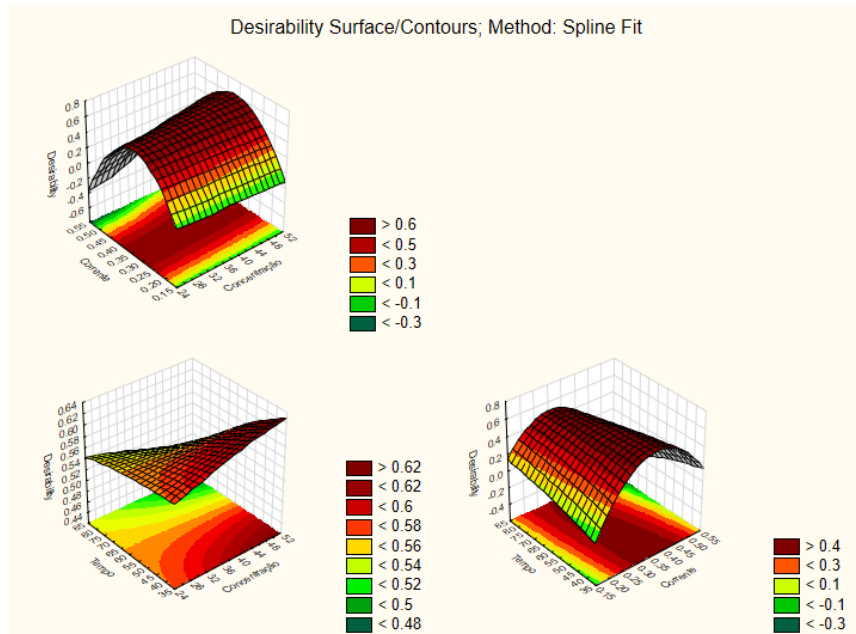


Figura 28: Gráfico de superfície de resposta para a eletrocoagulação com adição de coagulante orgânico.

Fonte: Statistica 13.

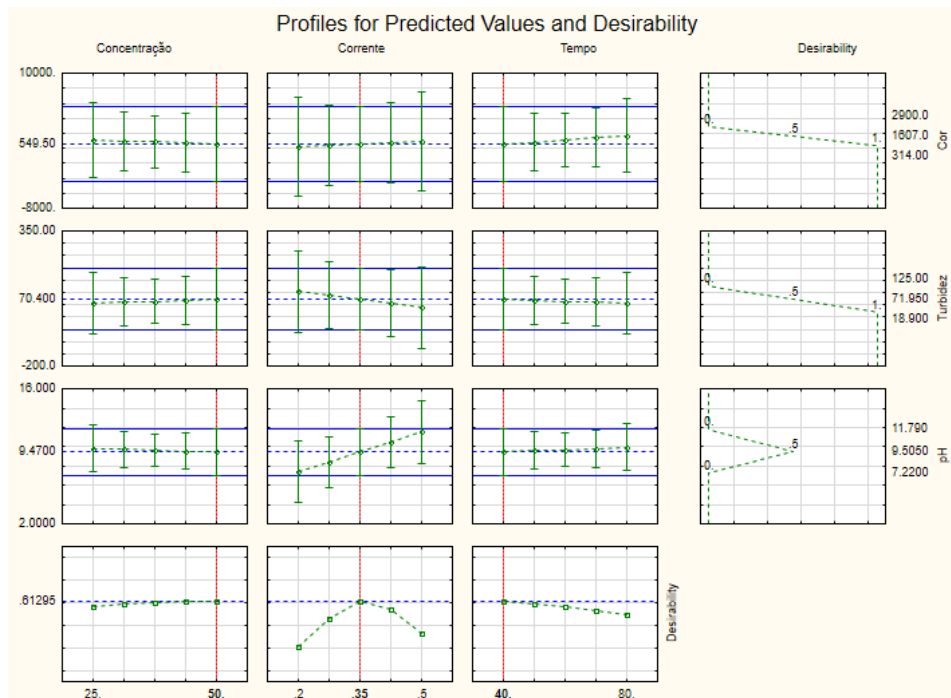


Figura 29: Gráficos de variáveis independentes e sua interação com os parâmetros cor aparente, turbidez e pH; para a eletrocoagulação com adição de coagulante orgânico.

Fonte: Statistica 13.



Analisando a Figura 27 pode-se observar que para o teste estático de significância, nenhum valor de  $p$  foi menos que 0,10. Isto quer dizer que nenhuma das variáveis ou interações entre elas apresentaram um nível de significância de 10%. Desta forma, os gráficos de superfície de resposta entre as variáveis independentes não são relevantes.

De acordo com Figura 29, conclui-se que, para a eletrocoagulação com adição de coagulante orgânico, o valor desejado para a concentração é de  $50 \text{ mg.L}^{-1}$ , para a corrente elétrica é de 0,35 A e para o tempo é de 40 minutos.

De acordo com a Figura 9 do item 5. 2. 3, para a eletrocoagulação com a adição de Tanfloc SG, o ensaio 19; que corresponde ao uso de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  do coagulante, 0,5 A de corrente elétrica e 80 minutos de processo apresenta o melhor resultado para a remoção do parâmetro turbidez (95,1%), entretanto o valor de remoção para essa concentração e corrente elétrica aos 40 minutos foi bem próxima da ótima (92,3%). O ensaio 13; que corresponde ao uso de  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  do coagulante, 0,2 A de corrente elétrica e 40 minutos de tempo de reação; apresenta os melhores resultados para a remoção do parâmetro cor (65,5%), neste caso a remoção do parâmetro cor aparente para essa concentração e corrente elétrica aos 80 minutos foi muito mais baixa (26,4%). Desta forma, conclui-se que o valor de 40 minutos e o valor médio da amperagem obtidos através da análise estatística são os melhores valores de tempo e corrente elétrica para alcançar os resultados desejados.

## 5. 6 ESTUDO CINÉTICO DO PROCESSO DE ELETROCOAGULAÇÃO

Estudos cinéticos analisam a velocidade em que as reações ocorrem, ou seja, como as concentrações de algumas espécies moleculares se alteram em função do tempo. A velocidade da eletrocoagulação, para os três tipos de processos apresentados, foi descrita pelo método da integral para a remoção do parâmetro

turbidez. A partir dos dados das Tabelas C.1, C.2, C.2, C.5, C.6, C.7, C.8, C.9 e C.10 do Apêndice C e das equações cinéticas pelo método da Integral, foram encontrados os valores para o estudo cinético da eletrocoagulação somente, eletrocoagulação com o uso de coagulante inorgânico e eletrocoagulação com o uso de coagulante orgânico. Nas Figuras 30, 31 e 32 é demonstrado o comportamento dos dados para a cinética de primeira ordem do processo de remoção da turbidez, e na Tabela 3 observa-se a velocidade (k) e do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

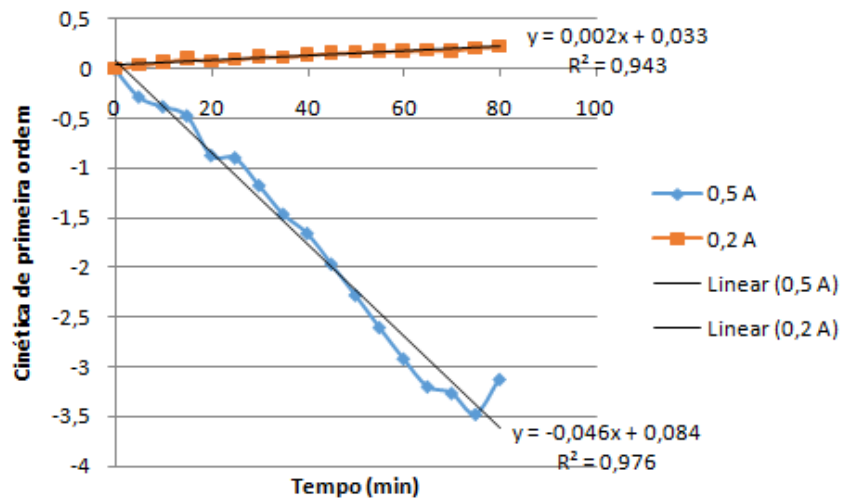


Figura 30: Variação da remoção da turbidez em função do tempo para cinética de primeira ordem para a eletrocoagulação somente.

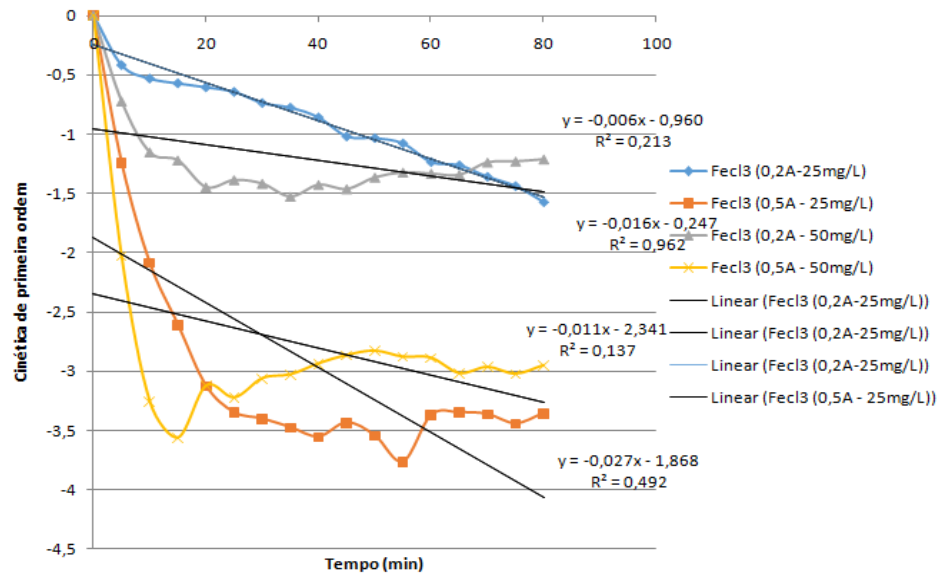


Figura 31: Variação da remoção da turbidez em função do tempo para cinética de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de Cloreto Férrico.

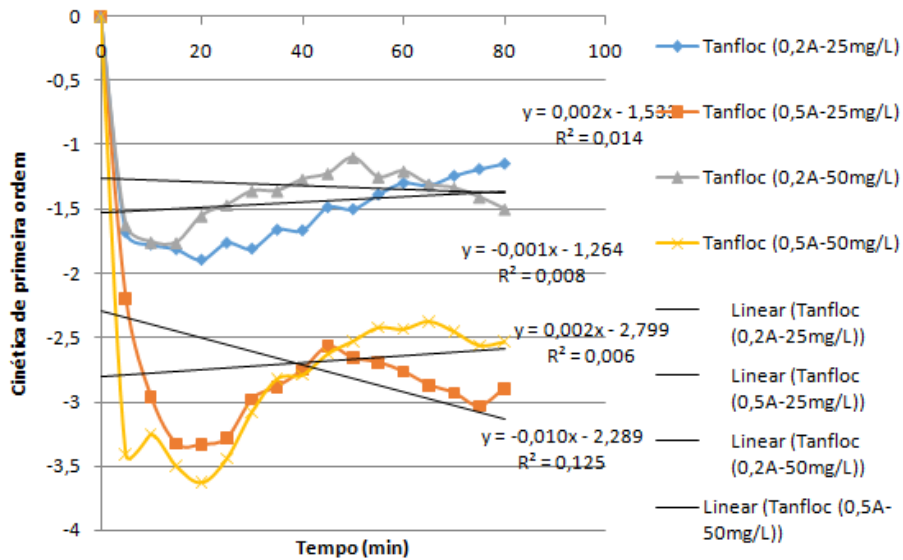


Figura 32: Variação da remoção da turbidez em função do tempo para cinética de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de Tanfloc SG.

**Tabela 3: Os valores da velocidade (k) e do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) para os dados linearizados da cinética de primeira ordem do processo de eletrocoagulação.**

COAGULANTE	CONCENTRAÇÃO (mg.L <sup>-1</sup> )	CORRENTE (A)	EQUAÇÃO CINÉTICA	k(uT.min <sup>-1</sup> )	R <sup>2</sup>
Nenhum	0	0,2	y = 0,002x + 0,033	-0,002	0,943
Nenhum	0	0,5	y = -0,046x + 0,084	0,046	0,976
Cloreto Férrico	25	0,2	y = -0,016x - 0,247	0,016	0,962
Cloreto Férrico	25	0,5	y = -0,027x - 1,868	0,027	0,492
Cloreto Férrico	50	0,2	y = -0,006x - 0,960	0,006	0,213
Cloreto Férrico	50	0,5	y = -0,011x - 2,341	0,011	0,137
Tanfloc SG	25	0,2	y = 0,002x - 1,533	-0,002	0,014
Tanfloc SG	25	0,5	y = -0,010x - 2,289	0,010	0,125
Tanfloc SG	50	0,2	y = -0,001x - 1,264	0,001	0,008
Tanfloc SG	50	0,5	y = 0,002x - 2,799	-0,002	0,137

Analisando a Figura 30 e a Tabela 3, conclui-se que a reação para a eletrocoagulação sem a presença de coagulação adicional apresentou comportamento linear satisfatório para ambas as correntes utilizadas, sendo seus valores de R<sup>2</sup> 0,943 para 0,2 A de corrente elétrica e 0,976 para 0,5 A de corrente elétrica.

Analisando as Figuras 31 e 32 e a Tabela 3, observou-se que o coagulante orgânico Tanfloc SG não apresentou comportamento linear para a cinética de primeira ordem pois seus respectivos valores de R<sup>2</sup> não foram próximos de 1. Já o coagulante inorgânico cloreto férrico, apresentou comportamento linear para a cinética de primeira ordem somente para a concentração de 25 mg.L<sup>-1</sup> e 0,2 A de corrente elétrica, apresentando um R<sup>2</sup> de 0,962.

## 6 CONCLUSÃO

De acordo com os ensaios realizados no presente trabalho, conclui-se que o processo de eletrocoagulação sem adição de agente coagulante para o tratamento de água é eficiente, ao se utilizar uma corrente elétrica de 0,5 A. Com a adição de coagulante inorgânico cloreto férrico e coagulante inorgânico Tanfloc SG, constatou-se uma melhora na remoção dos parâmetros cor aparente e turbidez, dependendo dos valores das variáveis concentração, corrente e tempo utilizadas.

Dentre todos os ensaios de eletrocoagulação realizados (com e sem o uso de agentes coagulantes), o ensaio 7, no qual foram utilizados  $25 \text{ mg.L}^{-1}$  de cloreto férrico, 0.5 A de corrente elétrica e 40 minutos de processo; foi o mais eficiente, resultando uma cor aparente de 270 uH (70,33% de remoção), turbidez de 12,4 uT (96,77% de remoção) e pH de 9,2. Observa-se também um bom resultado para o ensaio 2, onde foram utilizados 0,5 A de corrente elétrica e 40 minutos de reação, sem a adição de agente coagulante, principalmente para a remoção do parâmetro cor aparente que foi de 73.19%, porém para o parâmetro turbidez foi 85.94%, fazendo com que o resultado do ensaio 7 seja considerado melhor mesmo apresentando uma porcentagem de remoção do parâmetro cor aparente menor.

Com a realização das análises de remoção dos parâmetros cor aparente e turbidez da água de acordo com o tempo, quando aplicado o valor de 0,5 A de corrente elétrica, alcançou-se uma remoção máxima de 76,71% (212 uH final) do parâmetro cor aparente e 96,72% (12,6 uT final) do parâmetro turbidez.

Ao realizar adição de agentes coagulantes, o coagulante inorgânico cloreto férrico em conjunto com a eletrocoagulação mostrou-se mais eficiente em relação ao coagulante orgânico Tanfloc SG, para a remoção do parâmetro turbidez sendo que utilizando o primeiro foi obtido 97,68% de remoção (8,9 uT final), enquanto ao utilizar o segundo o melhor resultado foi de 96,43% de remoção (13,7 uT final).

Para a remoção do parâmetro cor aparente, o coagulante orgânico Tanfloc SG em conjunto com a eletrocoagulação mostrou-se mais eficiente em relação ao coagulante inorgânico cloreto férrico, sendo que utilizando o primeiro foi obtido 82,31%

de remoção (161 uH final), enquanto ao utilizar o segundo o melhor resultado foi de 81,32% de remoção (170 uH final).

De acordo com a análise estatística, para a execução da eletrocoagulação sem adição de coagulante, a corrente elétrica ideal para obter os resultados desejados deve ser 0,5 A, e o tempo de reação deve ser de 80 min. Para a eletrocoagulação com adição de coagulante inorgânico (cloreto férrico), a corrente elétrica desejada é de 0,425 A, com um tempo de 40 min e 25 mg.L<sup>-1</sup> de concentração. Para a eletrocoagulação com adição de coagulante orgânico (Tanfloc SG), a corrente elétrica ideal é de 0,35 A, com um tempo de reação de 40 min e 50 mg.L<sup>-1</sup>. Observando os valores desejados encontrados, conclui-se que os valores encontrados para as variáveis corrente elétrica, tempo de processo e concentração do agente coagulante (quando utilizado) nos melhores resultados do trabalho estão de acordo com a análise estatística.

Para o estudo do comportamento cinético, somente o ensaio da eletrocoagulação com adição de 25 mg.L<sup>-1</sup> de coagulante orgânico cloreto férrico e 0,2 A de corrente elétrica; e os 2 ensaios da eletrocoagulação sem uso de coagulante adicional apresentaram comportamento linear satisfatório para a cinética de primeira ordem.

Desta forma, conclui-se que a situação que apresentou os melhores resultados dos experimentos, levando em consideração a remoção do parâmetro cor aparente e turbidez em conjunto, foi a aplicação da eletrocoagulação com adição de 25 mg.L<sup>-1</sup> do coagulante inorgânico cloreto férrico, com 0,5 A de corrente elétrica e tempo de reação de 20 minutos, onde foram alcançados 81,32% de remoção (170 uH final) do parâmetro cor aparente e 96,48% de remoção (13,5 uT final) do parâmetro turbidez.

## REFERÊNCIAS

ADAPUREDDY, Sri Malini; GOEL, Sudha. **Optimizing Electrocoagulation of Drinking Water for Turbidity Removal in a Batch Reactor**. In: International Conference on Environmental Science and Technology, 2012, Singapura. Disponível em: <[http://www.ipcbee.com/vol30/020--ICEST2012\\_N30001.pdf](http://www.ipcbee.com/vol30/020--ICEST2012_N30001.pdf)> Acesso em: 12 set. 2015.

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

BAZRAFSHAN, Edris; OWNAGH, Kamal Aldin; MAHVI, Amir Hossein. **Application of Electrocoagulation Process Using Iron and Aluminum Electrodes for Fluoride Removal from Aqueous Environment**. E-Journal of Chemistry, 19 Dez., 2011. Disponível em: <[http://ier.tums.ac.ir/files/site1/pages/article\\_2.pdf](http://ier.tums.ac.ir/files/site1/pages/article_2.pdf)> Acesso em: 12 set. 2015.

BAGHVAND, Akbar et al. **Optimizing Coagulation Process for Low to High Turbidity Waters Using Aluminum and Iron Salts**. American Journal of Environmental Sciences. v. 6, 2010.

BENSADOK, K.; BENAMNAR, S. LAPICQUE, F.; NEZZAL, G. **Eletrocoagulation of cutting oil emulsions usingaluminiumplae electrodes**. Journal of Hazardous Materials, v.152, n.1, p. 423-430, junho, 2001.

BONGIOVANI, Milene Carvalho et al. Os benefícios da utilização de coagulantes naturais para a obtenção de água potável. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 32, n. 2 p. 167-170, 2010. Disponível em: <<http://eduem.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/8238/8238>>. Acesso em: 27 ago. 2015.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 17 Mar. 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Complementa e altera a Resolução nº 357/2005. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 13 Mai. 2011.

BRASIL. Ministério da Saúde. PORTARIA Nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre o padrão de qualidade e potabilidade da água para consumo humano e sobre os procedimentos de controle e fiscalização da mesma. Disponível em

BRASIL. Lei Federal nº 11.455, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Diário da União, Brasília, DF, 8 jan.

COMBATT, Maria Paulina Mendonza. **Aplicação da técnica de eletrocoagulação no tratamento de efluentes de abatedouros de aves**. 2014. 58 f. Dissertação (Pós-graduação em Ciências e Tecnologias de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015. Disponível em: <[http://www.tede.ufv.br/tedesimplificado/tde\\_arquivos/39/TDE-2014-09-23T142657Z-5588/Publico/texto%20completo.pdf](http://www.tede.ufv.br/tedesimplificado/tde_arquivos/39/TDE-2014-09-23T142657Z-5588/Publico/texto%20completo.pdf)>. Acesso em: 25 ago. 2015.

COMPANHIA DE SANEAMENTO DO PARANÁ (SANEPAR). **O tratamento da água**. 2010. Disponível em: <[http://educando.sanepar.com.br/ensino\\_fundamental/o-tratamento-da-%C3%A1gua](http://educando.sanepar.com.br/ensino_fundamental/o-tratamento-da-%C3%A1gua)>. Acesso em: 23 ago. 2015.

CORAL, L. A; BERGAMASCO, R; BASSETTI, F. J. **Estudo da viabilidade de utilização do polímero natural (TANFLOC) em substituição ao sulfato de alumínio no tratamento de águas para consumo**. In: International Workshop : Advances in Cleaner Production, 2009, São Paulo. Disponível em: <<http://www.advancesincleanerproduction.net/second/files/sessoes/4a/4/F.%20J.%20Bassetti%20-%20Resumo%20Exp.pdf>> Acesso em: 30 ago. 2015.

CRESPILHO, Frank Nelson; REZENDE, Maria Olímpia Oliveira. **Eletroflotação: princípios e aplicações**. 96p. São Carlos. 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa nacional de saneamento básico**. 2008. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB\\_2008.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf)>. Acesso em: 23 ago. 2015.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 3ª ed. Ed. da Universidade de São Paulo, v. 2, 2000.



LIBÂNIO, Marcelo et al. **Avaliação do emprego de sulfato de alumínio e do cloreto férrico na coagulação de águas naturais de turbidez média e cor elevada.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 19., 1997, Foz do Iguaçu.

LIBÂNIO, Marcelo. **Fundamentos da qualidade e tratamento de água.** 3. ed. Campinas: Átomo, 2010.

LO MONACO, Paola Alfonsa Vieira et al. **Utilização de extrato de semente de moringa como agente coagulante no tratamento de água para abastecimento e águas residuárias.** *Amby-Agua*, Taubaté, v. 5, n. 3, p. 222-231, 2010. Disponível em: <[http://www.gpqa.ufv.br/Publicacoes/coagulacao/Utilizacao\\_extrato\\_sementes\\_de\\_moringa.pdf](http://www.gpqa.ufv.br/Publicacoes/coagulacao/Utilizacao_extrato_sementes_de_moringa.pdf)>. Acesso em 27 ago. 2015.

MACEDO, Jorge A. B. de. **Águas e águas.** 3 ed. Belo Horizonte: Editora CRG, 2007.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **A ONU e a Água.** Disponível em: <<http://nacoesunidas.org/acao/agua/>> Acesso em: 19 set. 2015.

PATERNIANI, José E. S.; MANTOVANI, Marcia C.; SANT'ANNA, Marcia R. **Uso de sementes de moringa oleifera para tratamento de águas superficiais.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 765-771, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v13n6/v13n6a15.pdf>>. Acesso em 29 ago. 2015.

PEDROSO, Keylla et al. **Avaliação do tratamento do lixiviado do aterro sanitário de maringá, paraná, por processo de coagulação/floculação com TANFLOC SG.** *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 4, n. 2, 2012. Disponível em: <<http://www.revistaret.com.br/ojs-2.2.3/index.php/ret/article/viewFile/126/150>>. Acesso em: 29 ago. 2015.

PÁDUA, Valter Lúcio de; Bernardo, Luiz Di. **Método comparativo do tamanho dos flocos formados após coagulação com sulfato de alumínio e cloreto férrico.** In: XXVI Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Fortaleza, Ceará. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/ii-019.pdf>> Acesso em: 30 ago. 2015.

PAVANELLI, Gerson. **Eficiencia de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 2001. 2016 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

REBOUÇAS, Aldo da C. **Água na região Nordeste: desperdício e escassez**. 1997, vol.11, n.29, pp. 127-154. Disponível em :<<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40141997000100007>>. Acesso em: 18 ago. 2015.

PREFEITURA MUNICIPAL DE IBIPORÃ. **Dados Geográficos**. 2011. Disponível em: <<http://www.ibipora.pr.gov.br/conteudo/mostrar/id/1136/titulo/Dados+Geogr%C3%A1ficos>> Acesso em: 15 set. 2015.

RUBIM, Cristiane. Produtos químicos para tratamento de água. **Revista TAE**, ed. 6, abr. 2012. Disponível em: <<http://www.revistatae.com.br/noticialnt.asp?id=3915>> Acesso em: 2 set. 2015.

SANTOLIN, C; ESPINOZA-QUINONES, F.RÇ; SOUZA; A.R.C. de. **Tratamento de efluente do fármaco ciprofloxacina em reator de eletrocoagulação utilizando eletrodos de alumínio**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 9, 2015, Campinas. p. 2.

THEODORO, Paulo Sergio. **Utilização da eletrocoagulação no tratamento de efluentes da indústria galvânica**. 2010. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná , Campus de Toledo, Paraná, 2010.

THEODORO, Joseane Débora Peruço. **Estudo dos mecanismos de coagulação/floculação para a obtenção de água de abastecimento para o consumo humano**. 2012. 185 f. Dissertação – Doutorado em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Paraná, 2012.

TRESVISAN, Thales Schwanka. **Coagulante Tanfloc SG como alternativa ao uso de coagulantes químicos no tratamento de água na ETA Cafezal**. 2012. 105 f. Monografia (Teste de Conclusão de Curso) – Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012. Disponível em:<[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2610/1/LD\\_COEAM\\_2013\\_2\\_23.pdf](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2610/1/LD_COEAM_2013_2_23.pdf)> Acesso em: 18 out. 2015.

ZOLLET, Elis Regina; JABUR, Andrea Sartori. **Uso de polímero natural a base de tanino (TANFLOC) para o tratamento de água para o consumo humano.** In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2013, Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul. Acesso em: <[http://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/f3e044f81c8cf1a6bc3bde55ce83efc0\\_a228bfaef3c220a95cd7de6689ba084e.pdf](http://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/f3e044f81c8cf1a6bc3bde55ce83efc0_a228bfaef3c220a95cd7de6689ba084e.pdf)>. Acesso em: 29 ag. 2015.

## APÊNDICE A – Tabelas dos Ensaios de Eletrocoagulação

Tabela A.1: Resultados dos ensaios de eletrocoagulação sem adição de coagulante, seguindo planejamento experimental.

ENSAIO	CORRENTE (A)	TEMPO(min)	COR(uH)	TURBIDEZ(uT)	pH
2	0,5	40	244	15,7	10,84
3	0,2	80	1560	479	7,28
4	0,5	80	297	12,6	11,78
1	0,2	40	1400	442	7,25

Tabela A.2: Resultados dos ensaios de eletrocoagulação com adição de coagulante inorgânico cloreto férrico, seguindo planejamento experimental.

ENSAIO	CONCENTRAÇÃO(mg.L <sup>-1</sup> )	CORRENTE(A)	TEMPO(min)	COR (uH)	TURBIDEZ(uT)	pH
12	50	0,5	80	1960	17,2	11,57
7	25	0,5	40	270	12,4	9,21
11	25	0,5	80	332	14,6	11,3
5	25	0,2	40	520	139	8,18
10	50	0,2	80	608	119	7,1
8	50	0,5	40	1790	21,9	11,78
6	50	0,2	40	356	887	6,6
9	25	0,2	80	390	76,1	9,17

**Tabela A.3: Resultados dos ensaios de eletrocoagulação com adição de coagulante orgânico tanfloc SG, seguindo planejamento experimental.**

<b>ENSAIO</b>	<b>CONCENTRAÇÃO (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>CORRENTE (A)</b>	<b>TEMPO (min)</b>	<b>COR (uH)</b>	<b>TURBIDEZ (uT)</b>	<b>pH</b>
20	50	0,5	80	2900	30,2	11,67
15	25	0,5	40	1980	29,4	11,79
19	25	0,5	80	1730	18,9	11,74
13	25	0,2	40	314	86,9	7,8
18	50	0,2	80	490	84,8	8,18
16	50	0,5	40	489	27,8	11,72
14	50	0,2	40	610	113	7,22
17	25	0,2	80	670	125	7,31

APÊNDICE B – Tabelas das Remoções dos Parâmetros Cor Aparente e Turbidez do Processo de Eletrocoagulação de Acordo com o Tempo.

Tabela B.1: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 3.

CORRENTE ELÉTRICA (A)	CONCENTRAÇÃO (mg.L <sup>-1</sup> )	TEMPO (min)	COR (uH)	TURBIDEZ (uT)	REMOÇÃO TURB (%)	REMOÇÃO COR (%)
0,2	0	0	910	384	0	0
0,2	0	5	1160	397	-3,385416667	-27,4725
0,2	0	10	1210	410	-6,770833333	-32,967
0,2	0	15	1270	424	-10,41666667	-39,5604
0,2	0	20	1540	414	-7,8125	-69,2308
0,2	0	25	1300	419	-9,114583333	-42,8571
0,2	0	30	1260	434	-13,02083333	-38,4615
0,2	0	35	1410	431	-12,23958333	-54,9451
0,2	0	40	1400	442	-15,10416667	-53,8462
0,2	0	45	1420	448	-16,66666667	-56,044
0,2	0	50	1530	453	-17,96875	-68,1319
0,2	0	55	1520	457	-19,01041667	-67,033
0,2	0	60	1640	458	-19,27083333	-80,2198
0,2	0	65	1520	463	-20,57291667	-67,033
0,2	0	70	1530	460	-19,79166667	-68,1319
0,2	0	75	1580	473	-23,17708333	-73,6264
0,2	0	80	1560	479	-24,73958333	-71,4286



Tabela B.2: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 4.

CORRENTE ELÉTRICA (A)	CONCENTRAÇÃO (mg.L <sup>-1</sup> )	TEMPO (min)	COR (uH)	TURBIDEZ (uT)	REMOÇÃO TURB (%)	REMOÇÃO COR (%)
0,5	0	0	910	384	0	0
0,5	0	5	730	263	31,51041667	19,7802
0,5	0	10	692	240	37,5	23,956
0,5	0	15	663	161	58,07291667	27,1429
0,5	0	20	550	157	59,11458333	39,5604
0,5	0	25	540	119	69,01041667	40,6593
0,5	0	30	480	89,1	76,796875	47,2527
0,5	0	35	352	73,5	80,859375	61,3187
0,5	0	40	291	54	85,9375	68,022
0,5	0	45	244	39,5	89,71354167	73,1868
0,5	0	50	222	28,5	92,578125	75,6044
0,5	0	55	212	20,8	94,58333333	76,7033
0,5	0	60	238	15,7	95,91145833	73,8462
0,5	0	65	244	14,7	96,171875	73,1868
0,5	0	70	260	11,9	96,90104167	71,4286
0,5	0	75	266	16,9	95,59895833	70,7692
0,5	0	80	326	12,6	96,71875	64,1758

Tabela B.3: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 9.

<b>CORRENTE ELÉTRICA (A)</b>	<b>CONCENTRAÇÃO (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>TEMPO (min)</b>	<b>COR (uH)</b>	<b>TURBIDEZ (uT)</b>	<b>REMOÇÃO TURBIDEZ (%)</b>	<b>REMOÇÃO COR (%)</b>
0,2	25	0	710	253	34,11458333	21,97802198
0,2	25	5	660	226	41,14583333	27,47252747
0,2	25	10	620	217	43,48958333	31,86813187
0,2	25	15	690	210	45,3125	24,17582418
0,2	25	20	650	202	47,39583333	28,57142857
0,2	25	25	680	184	52,08333333	25,27472527
0,2	25	30	570	177	53,90625	37,36263736
0,2	25	35	500	163	57,55208333	45,05494505
0,2	25	40	520	139	63,80208333	42,85714286
0,2	25	45	480	137	64,32291667	47,25274725
0,2	25	50	420	131	65,88541667	53,84615385
0,2	25	55	460	112	70,83333333	49,45054945
0,2	25	60	440	109	71,61458333	51,64835165
0,2	25	65	430	99	74,21875	52,74725275
0,2	25	70	380	91,5	76,171875	58,24175824
0,2	25	75	396	80	79,16666667	56,48351648
0,2	25	80	390	76,1	80,18229167	57,14285714

Tabela B.4: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 11.

<b>CORRENTE ELÉTRICA (A)</b>	<b>CONCENTRAÇÃO (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>TEMPO (min)</b>	<b>COR (uH)</b>	<b>TURBIDEZ (uT)</b>	<b>REMOÇÃO TURBIDEZ (%)</b>	<b>REMOÇÃO COR (%)</b>
0,5	25	0	290	111	71,09375	68,13186813
0,5	25	5	238	47,7	87,578125	73,84615385
0,5	25	10	199	28,3	92,63020833	78,13186813
0,5	25	15	183	16,9	95,59895833	79,89010989
0,5	25	20	170	13,5	96,484375	81,31868132
0,5	25	25	181	12,8	96,66666667	80,10989011
0,5	25	30	220	11,9	96,90104167	75,82417582
0,5	25	35	241	11	97,13541667	73,51648352
0,5	25	40	270	12,4	96,77083333	70,32967033
0,5	25	45	300	11,1	97,109375	67,03296703
0,5	25	50	303	8,9	97,68229167	66,7032967
0,5	25	55	313	13,2	96,5625	65,6043956
0,5	25	60	353	13,5	96,484375	61,20879121
0,5	25	65	324	13,3	96,53645833	64,3956044
0,5	25	70	300	12,3	96,796875	67,03296703
0,5	25	75	450	13,4	96,51041667	50,54945055
0,5	25	80	332	14,6	96,19791667	63,51648352

Tabela B.5: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 10.

CORRENTE ELÉTRICA (A)	CONCENTRAÇÃO (mg.L <sup>-1</sup> )	TEMPO (min)	COR (uH)	TURBIDEZ (uT)	REMOÇÃO TURBIDEZ (%)	REMOÇÃO COR (%)
0,2	50	0	480	186	51,5625	47,25274725
0,2	50	5	470	121	68,48958333	48,35164835
0,2	50	10	330	113	70,57291667	63,73626374
0,2	50	15	300	90,1	76,53645833	67,03296703
0,2	50	20	299	95,7	75,078125	67,14285714
0,2	50	25	325	92,8	75,83333333	64,28571429
0,2	50	30	306	83,2	78,33333333	66,37362637
0,2	50	35	348	91,9	76,06770833	61,75824176
0,2	50	40	356	88,7	76,90104167	60,87912088
0,2	50	45	416	97,8	74,53125	54,28571429
0,2	50	50	424	102	73,4375	53,40659341
0,2	50	55	442	101	73,69791667	51,42857143
0,2	50	60	464	100	73,95833333	49,01098901
0,2	50	65	490	111	71,09375	46,15384615
0,2	50	70	590	112	70,83333333	35,16483516
0,2	50	75	600	114	70,3125	34,06593407
0,2	50	80	608	119	69,01041667	33,18681319

Tabela B.6: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 12.

CORRENTE ELÉTRICA (A)	CONCENTRAÇÃO (mg.L <sup>-1</sup> )	TEMPO (min)	COR (uH)	TURBIDEZ (uT)	REMOÇÃO TURBIDEZ (%)	REMOÇÃO COR (%)
0,5	50	0	246	50,4	86,875	72,96703297
0,5	50	5	244	14,8	96,14583333	73,18681319
0,5	50	10	208	10,9	97,16145833	77,14285714
0,5	50	15	431	16,9	95,59895833	52,63736264
0,5	50	20	441	15,3	96,015625	51,53846154
0,5	50	25	495	18	95,3125	45,6043956
0,5	50	30	1300	18,6	95,15625	-42,85714286
0,5	50	35	2020	20,4	94,6875	-121,978022
0,5	50	40	1790	21,9	94,296875	-96,7032967
0,5	50	45	1930	22,7	94,08854167	-112,0879121
0,5	50	50	1890	21,6	94,375	-107,6923077
0,5	50	55	2290	21,4	94,42708333	-151,6483516
0,5	50	60	2310	18,8	95,10416667	-153,8461538
0,5	50	65	2360	19,8	94,84375	-159,3406593
0,5	50	70	2250	18,7	95,13020833	-147,2527473
0,5	50	75	2410	20,1	94,765625	-164,8351648
0,5	50	80	1960	17,2	95,52083333	-115,3846154

Tabela B.7: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 17.

CORRENTE ELÉTRICA (A)	CONCENTRAÇÃO (mg.L <sup>-1</sup> )	TEMPO (min)	COR (uH)	TURBIDEZ (uT)	REMOÇÃO TURBIDEZ (%)	REMOÇÃO COR (%)
0,2	25	0	172	71,4	-505,5979644	-1373,86
0,2	25	5	161	65	-451,3146735	-1279,61
0,2	25	10	196	62,6	-430,9584394	-1579,52
0,2	25	15	195	57,7	-389,3977947	-1570,95
0,2	25	20	199	65,8	-458,1000848	-1605,23
0,2	25	25	239	62,9	-433,5029686	-1947,99
0,2	25	30	246	72,9	-518,3206107	-2007,97
0,2	25	35	295	72,6	-515,7760814	-2427,85
0,2	25	40	314	86,9	-637,0653096	-2590,66
0,2	25	45	352	85,6	-626,0390161	-2916,28
0,2	25	50	385	96	-714,2493639	-3199,06
0,2	25	55	429	105	-790,5852417	-3576,09
0,2	25	60	442	103	-773,6217133	-3687,49
0,2	25	65	483	111	-841,475827	-4038,82
0,2	25	70	680	117	-892,3664122	-5726,91
0,2	25	75	620	122	-934,7752332	-5212,77
0,2	25	80	670	125	-960,2205259	-5641,22

Tabela B.8: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 19.

CORRENTE ELÉTRICA (A)	CONCENTRAÇÃO (mg,L <sup>-1</sup> )	TEMPO (min)	COR (uH)	TURBIDEZ (uT)	REMOÇÃO TURBIDEZ (%)	REMOÇÃO COR (%)
0,5	25	0	307	42,9	-263,8676845	-2530,676949
0,5	25	5	294	19,9	-68,78710772	-2419,280206
0,5	25	10	288	13,8	-17,04834606	-2367,866324
0,5	25	15	365	13,7	-16,20016964	-3027,677806
0,5	25	20	428	14,4	-22,13740458	-3567,523565
0,5	25	25	404	19,5	-65,39440204	-3361,868038
0,5	25	30	462	21,5	-82,35793045	-3858,868895
0,5	25	35	467	24,5	-107,8032231	-3901,713796
0,5	25	40	1980	29,4	-149,3638677	-16866,58098
0,5	25	45	2320	26,9	-128,1594572	-19780,03428
0,5	25	50	2510	26	-120,5258694	-21408,14053
0,5	25	55	1980	24,2	-105,2586938	-16866,58098
0,5	25	60	1820	21,8	-84,90245971	-15495,54413
0,5	25	65	2180	20,5	-73,87616624	-18580,37704
0,5	25	70	2010	18,5	-56,91263783	-17123,65039
0,5	25	75	2340	21,2	-79,81340119	-19951,41388
0,5	25	80	1730	18,9	-60,30534351	-14724,3359

Tabela B.9: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 18.

CORRENTE ELÉTRICA (A)	CONCENTRAÇÃO (mg.L <sup>-1</sup> )	TEMPO (min)	COR (uH)	TURBIDEZ (uT)	REMOÇÃO TURBIDEZ (%)	REMOÇÃO COR (%)
0,2	50	0	268	75,6	-541,221374	-2196,486718
0,2	50	5	291	66,3	-462,3409669	-2393,573265
0,2	50	10	346	65,9	-458,9482612	-2864,867181
0,2	50	15	416	81,3	-589,56743	-3464,695801
0,2	50	20	459	88,4	-649,7879559	-3833,161954
0,2	50	25	510	98,6	-736,3019508	-4270,179949
0,2	50	30	530	98,7	-737,1501272	-4441,559554
0,2	50	35	540	108	-816,0305344	-4527,249357
0,2	50	40	610	113	-858,4393554	-5127,077978
0,2	50	45	700	128	-985,6658185	-5898,286204
0,2	50	50	630	110	-832,9940628	-5298,457584
0,2	50	55	610	115	-875,4028838	-5127,077978
0,2	50	60	550	104	-782,1034775	-4612,93916
0,2	50	65	660	101	-756,6581849	-5555,526992
0,2	50	70	580	94,1	-698,1340119	-4870,008569
0,2	50	75	470	85,7	-626,8871925	-3927,420737
0,2	50	80	490	84,8	-619,2536047	-4098,800343



Tabela B.10: Valores das remoções dos parâmetros cor aparente e turbidez de acordo com o tempo, para o ensaio 20.

CORRENTE ELÉTRICA (A)	CONCENTRAÇÃO (mg.L <sup>-1</sup> )	TEMPO (min)	COR (uH)	TURBIDEZ (uT)	REMOÇÃO TURBIDEZ (%)	REMOÇÃO COR (%)
0,5	50	0	660	12,7	-7,718405428	-5555,526992
0,5	50	5	260	14,9	-26,37828668	-2127,934876
0,5	50	10	299	11,6	1,611535199	-2462,125107
0,5	50	15	339	10,2	13,48600509	-2804,884319
0,5	50	20	350	12,3	-4,325699746	-2899,143102
0,5	50	25	427	17,7	-50,12722646	-3558,954584
0,5	50	30	471	22,9	-94,23240034	-3935,989717
0,5	50	35	474	23,6	-100,1696353	-3961,696658
0,5	50	40	489	27,8	-135,793045	-4090,231362
0,5	50	45	2360	30,7	-160,3901612	-20122,79349
0,5	50	50	2280	34,1	-189,2281595	-19437,27506
0,5	50	55	2890	33,7	-185,8354538	-24664,35304
0,5	50	60	2850	35,8	-203,6471586	-24321,59383
0,5	50	65	3240	33,1	-180,7463953	-27663,49614
0,5	50	70	3130	29,7	-151,9083969	-26720,90831
0,5	50	75	3490	30,5	-158,6938083	-29805,74122
0,5	50	80	2900	30,2	-156,1492791	-24750,04284

APÊNDICE C – Tabelas dos Dados Utilizados para Elaboração dos Gráficos de Comportamento Cinético de Primeira Ordem para o Processo de Eletrocoagulação,

**Tabela C.1: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação sem adição de coagulante, com 0,2 A de corrente elétrica.**

<b>CORRENTE ELÉTRICA (A)</b>	<b>TEMPO (min)</b>	<b>C<sub>A0</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub>/C<sub>A0</sub> (turbidez -uT/uT)</b>	<b>Ln (turbidez)</b>
0,2	0	384	384	1	0
0,2	5	384	397	1,033854167	0,033293728
0,2	10	384	410	1,067708333	0,065514607
0,2	15	384	424	1,104166667	0,099090903
0,2	20	384	414	1,078125	0,075223421
0,2	25	384	419	1,091145833	0,087228367
0,2	30	384	434	1,130208333	0,122401982
0,2	35	384	431	1,122395833	0,115465538
0,2	40	384	442	1,151041667	0,140667329
0,2	45	384	448	1,166666667	0,15415068
0,2	50	384	453	1,1796875	0,165249573
0,2	55	384	457	1,190104167	0,174040838
0,2	60	384	458	1,192708333	0,176226632
0,2	65	384	463	1,205729167	0,187084501
0,2	70	384	460	1,197916667	0,180583937
0,2	75	384	473	1,231770833	0,208452836
0,2	80	384	479	1,247395833	0,221058045

**Tabela C.2: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação sem adição de coagulante, com 0,5 A de corrente elétrica.**

<b>CORRENTE ELÉTRICA (A)</b>	<b>TEMPO (min)</b>	<b>C<sub>A0</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub>/C<sub>A0</sub> (turbidez -uT/uT)</b>	<b>Ln (turbidez)</b>
0,5	0	384	384	1	0
0,5	5	384	290	0,755208333	-0,28076163
0,5	10	384	263	0,684895833	-0,37848852
0,5	15	384	240	0,625	-0,470003629
0,5	20	384	161	0,419270833	-0,869238188
0,5	25	384	157	0,408854167	-0,894396747
0,5	30	384	119	0,309895833	-1,171519059
0,5	35	384	89,1	0,23203125	-1,460883218
0,5	40	384	73,5	0,19140625	-1,653357146
0,5	45	384	54	0,140625	-1,961658506
0,5	50	384	39,5	0,102864583	-2,274341881
0,5	55	384	28,5	0,07421875	-2,600738465
0,5	60	384	20,8	0,054166667	-2,915689566
0,5	65	384	15,7	0,040885417	-3,19698184
0,5	70	384	14,7	0,03828125	-3,262795059
0,5	75	384	11,9	0,030989583	-3,474104152
0,5	80	384	16,9	0,044010417	-3,123328931

**Tabela C.3: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 25 mg.L<sup>-1</sup> coagulante inorgânico, com 0,2 A de corrente elétrica.**

<b>CORRENTE ELÉTRICA (A)</b>	<b>CONCENTRAÇÃO (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>TEMPO (min)</b>	<b>C<sub>A0</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub>/C<sub>A0</sub> (turbidez -uT/uT)</b>	<b>Ln (turbidez)</b>
0,2	25	0	384	253	0,658854167	0,417253
0,2	25	5	384	226	0,588541667	0,530108
0,2	25	10	384	217	0,565104167	0,570745
0,2	25	15	384	210	0,546875	0,603535
0,2	25	20	384	202	0,526041667	0,642375
0,2	25	25	384	184	0,479166667	0,735707
0,2	25	30	384	177	0,4609375	0,774493
0,2	25	35	384	163	0,424479167	0,856892
0,2	25	40	384	139	0,361979167	1,016169
0,2	25	45	384	137	0,356770833	1,030662
0,2	25	50	384	131	0,341145833	1,075445
0,2	25	55	384	112	0,291666667	1,232144
0,2	25	60	384	109	0,283854167	1,259295
0,2	25	65	384	99	0,2578125	1,355523
0,2	25	70	384	91,5	0,23828125	1,434304
0,2	25	75	384	80	0,208333333	1,568616
0,2	25	80	384	76,1	0,198177083	1,618594

Tabela C.4: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 25 mg.L<sup>-1</sup> coagulante inorgânico, com 0,5 A de corrente elétrica.

CORRENTE ELÉTRICA (A)	CONCENTRAÇÃO (mg.L <sup>-1</sup> )	TEMPO (min)	C <sub>A0</sub> (turbidez- uT)	C <sub>A</sub> (turbidez- uT)	C <sub>A</sub> /C <sub>A0</sub> (turbidez -uT/uT)	Ln (turbidez)
0,5	25	0	384	111	0,2890625	-1,241112
0,5	25	5	384	47,7	0,12421875	-2,085711
0,5	25	10	384	28,3	0,073697917	-2,607781
0,5	25	15	384	16,9	0,044010417	-3,123329
0,5	25	20	384	13,5	0,03515625	-3,347953
0,5	25	25	384	12,8	0,033333333	-3,401197
0,5	25	30	384	11,9	0,030989583	-3,474104
0,5	25	35	384	11	0,028645833	-3,552747
0,5	25	40	384	12,4	0,032291667	-3,432946
0,5	25	45	384	11,1	0,02890625	-3,543697
0,5	25	50	384	8,9	0,023177083	-3,764591
0,5	25	55	384	13,2	0,034375	-3,370426
0,5	25	60	384	13,5	0,03515625	-3,347953
0,5	25	65	384	13,3	0,034635417	-3,362879
0,5	25	70	384	12,3	0,03203125	-3,441043
0,5	25	75	384	13,4	0,034895833	-3,355388
0,5	25	80	384	14,6	0,038020833	-3,269621

**Tabela C.5: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 50 mg.L<sup>-1</sup> coagulante inorgânico, com 0,2 A de corrente elétrica.**

<b>CORRENTE ELÉTRICA (A)</b>	<b>CONCENTRAÇÃO (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>TEMPO (min)</b>	<b>C<sub>A0</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub>/C<sub>A0</sub> (turbidez -uT/uT)</b>	<b>Ln (turbidez)</b>
0,2	50	0	384	186	0,484375	-0,724896
0,2	50	5	384	121	0,315104167	-1,154852
0,2	50	10	384	113	0,294270833	-1,223255
0,2	50	15	384	90,1	0,234635417	-1,449722
0,2	50	20	384	95,7	0,24921875	-1,389424
0,2	50	25	384	92,8	0,241666667	-1,420196
0,2	50	30	384	83,2	0,216666667	-1,529395
0,2	50	35	384	91,9	0,239322917	-1,429942
0,2	50	40	384	88,7	0,230989583	-1,465383
0,2	50	45	384	97,8	0,2546875	-1,367718
0,2	50	50	384	102	0,265625	-1,32567
0,2	50	55	384	101	0,263020833	-1,335522
0,2	50	60	384	100	0,260416667	-1,345472
0,2	50	65	384	111	0,2890625	-1,241112
0,2	50	70	384	112	0,291666667	-1,232144
0,2	50	75	384	114	0,296875	-1,214444
0,2	50	80	384	119	0,309895833	-1,171519

**Tabela C.6: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 50 mg.L<sup>-1</sup> coagulante inorgânico, com 0,5 A de corrente elétrica.**

<b>CORRENTE ELÉTRICA (A)</b>	<b>CONCENTRAÇÃO (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>TEMPO (min)</b>	<b>C<sub>A0</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub>/C<sub>A0</sub> (turbidez -uT/uT)</b>	<b>Ln (turbidez)</b>
0,5	50	0	384	50,4	0,13125	-2,030651
0,5	50	5	384	14,8	0,038541667	-3,256015
0,5	50	10	384	10,9	0,028385417	-3,56188
0,5	50	15	384	16,9	0,044010417	-3,123329
0,5	50	20	384	15,3	0,03984375	-3,22279
0,5	50	25	384	18	0,046875	-3,060271
0,5	50	30	384	18,6	0,0484375	-3,027481
0,5	50	35	384	20,4	0,053125	-2,935108
0,5	50	40	384	21,9	0,05703125	-2,864156
0,5	50	45	384	22,7	0,059114583	-2,828278
0,5	50	50	384	21,6	0,05625	-2,877949
0,5	50	55	384	21,4	0,055729167	-2,887252
0,5	50	60	384	18,8	0,048958333	-3,016786
0,5	50	65	384	19,8	0,0515625	-2,964961
0,5	50	70	384	18,7	0,048697917	-3,022119
0,5	50	75	384	20,1	0,05234375	-2,949923
0,5	50	80	384	17,2	0,044791667	-3,105733



Tabela C.7: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 25 mg.L<sup>-1</sup> coagulante orgânico, com 0,2 A de corrente elétrica.

CORRENTE ELÉTRICA (A)	CONCENTRAÇÃO (mg.L <sup>-1</sup> )	TEMPO (min)	C <sub>A0</sub> (turbidez- uT)	C <sub>A</sub> (turbidez- uT)	C <sub>A</sub> /C <sub>A0</sub> (turbidez -uT/uT)	Ln (turbidez)
0,2	25	0	384	71,4	0,1859375	-1,682345
0,2	25	5	384	65	0,169270833	-1,776255
0,2	25	10	384	62,6	0,163020833	-1,813877
0,2	25	15	384	57,7	0,150260417	-1,895385
0,2	25	20	384	65,8	0,171354167	-1,764023
0,2	25	25	384	62,9	0,163802083	-1,809096
0,2	25	30	384	72,9	0,18984375	-1,661554
0,2	25	35	384	72,6	0,1890625	-1,665678
0,2	25	40	384	86,9	0,226302083	-1,485885
0,2	25	45	384	85,6	0,222916667	-1,500957
0,2	25	50	384	96	0,25	-1,386294
0,2	25	55	384	105	0,2734375	-1,296682
0,2	25	60	384	103	0,268229167	-1,315914
0,2	25	65	384	111	0,2890625	-1,241112
0,2	25	70	384	117	0,3046875	-1,188469
0,2	25	75	384	122	0,317708333	-1,146622
0,2	25	80	384	125	0,325520833	-1,122329

**Tabela C.9: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 25 mg.L<sup>-1</sup> coagulante orgânico, com 0,5 A de corrente elétrica.**

<b>CORRENTE ELÉTRICA (A)</b>	<b>CONCENTRAÇÃO (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>TEMPO (min)</b>	<b>C<sub>A0</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub>/C<sub>A0</sub> (urbidez -uT/uT)</b>	<b>Ln (turbidez)</b>
0,5	25	0	384	42,9	0,11171875	-2,191771
0,5	25	5	384	19,9	0,051822917	-2,959923
0,5	25	10	384	13,8	0,0359375	-3,325974
0,5	25	15	384	13,7	0,035677083	-3,333247
0,5	25	20	384	14,4	0,0375	-3,283414
0,5	25	25	384	19,5	0,05078125	-2,980228
0,5	25	30	384	21,5	0,055989583	-2,88259
0,5	25	35	384	24,5	0,063802083	-2,751969
0,5	25	40	384	29,4	0,0765625	-2,569648
0,5	25	45	384	26,9	0,070052083	-2,658516
0,5	25	50	384	26	0,067708333	-2,692546
0,5	25	55	384	24,2	0,063020833	-2,76429
0,5	25	60	384	21,8	0,056770833	-2,868733
0,5	25	65	384	20,5	0,053385417	-2,930218
0,5	25	70	384	18,5	0,048177083	-3,032872
0,5	25	75	384	21,2	0,055208333	-2,896641
0,5	25	80	384	18,9	0,04921875	-3,011481

Tabela C.9: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 50 mg.L<sup>-1</sup> coagulante orgânico, com 0,2 A de corrente elétrica.

CORRENTE ELÉTRICA (A)	CONCENTRAÇÃO (mg.L <sup>-1</sup> )	TEMPO (min)	C <sub>A0</sub> (turbidez- uT)	C <sub>A</sub> (turbidez- uT)	C <sub>A</sub> /C <sub>A0</sub> (turbidez -uT/uT)	Ln (turbidez)
0,2	50	0	384	75,6	0,196875	-1,625186
0,2	50	5	384	66,3	0,17265625	-1,756453
0,2	50	10	384	65,9	0,171614583	-1,762504
0,2	50	15	384	81,3	0,21171875	-1,552497
0,2	50	20	384	88,4	0,230208333	-1,468771
0,2	50	25	384	98,6	0,256770833	-1,359571
0,2	50	30	384	98,7	0,25703125	-1,358558
0,2	50	35	384	108	0,28125	-1,268511
0,2	50	40	384	113	0,294270833	-1,223255
0,2	50	45	384	128	0,333333333	-1,098612
0,2	50	50	384	110	0,286458333	-1,250162
0,2	50	55	384	115	0,299479167	-1,20571
0,2	50	60	384	104	0,270833333	-1,306252
0,2	50	65	384	101	0,263020833	-1,335522
0,2	50	70	384	94,1	0,245052083	-1,406285
0,2	50	75	384	85,7	0,223177083	-1,49979
0,2	50	80	384	84,8	0,220833333	-1,510347

**Tabela C.10: Dados utilizados para elaboração do gráfico do comportamento cinético de primeira ordem para a eletrocoagulação com adição de 50 mg.L<sup>-1</sup> coagulante orgânico, com 0,5 A de corrente elétrica.**

<b>CORRENTE ELÉTRICA (A)</b>	<b>CONCENTRAÇÃO (mg.L<sup>-1</sup>)</b>	<b>TEMPO (min)</b>	<b>C<sub>A0</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub> (turbidez- uT)</b>	<b>C<sub>A</sub>/C<sub>A0</sub> (turbidez -uT/uT)</b>	<b>Ln (turbidez)</b>
0,5	50	0	384	12,7	0,033072917	-3,409041
0,5	50	5	384	14,9	0,038802083	-3,249281
0,5	50	10	384	11,6	0,030208333	-3,499637
0,5	50	15	384	10,2	0,0265625	-3,628255
0,5	50	20	384	12,3	0,03203125	-3,441043
0,5	50	25	384	17,7	0,04609375	-3,077078
0,5	50	30	384	22,9	0,059635417	-2,819506
0,5	50	35	384	23,6	0,061458333	-2,789396
0,5	50	40	384	27,8	0,072395833	-2,625607
0,5	50	45	384	30,7	0,079947917	-2,52638
0,5	50	50	384	34,1	0,088802083	-2,421345
0,5	50	55	384	33,7	0,087760417	-2,433145
0,5	50	60	384	35,8	0,093229167	-2,372695
0,5	50	65	384	33,1	0,086197917	-2,451109
0,5	50	70	384	29,7	0,07734375	-2,559496
0,5	50	75	384	30,5	0,079427083	-2,532916
0,5	50	80	384	30,2	0,078645833	-2,542801