UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS LONDRINA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

BRUNO KENZO NAGAO

ASSOCIAÇÃO DA ELETROCOAGULAÇÃO COM OS SAIS CLORETO DE SÓDIO E CLORETO DE POTÁSSIO PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA
2017

BRUNO KENZO NAGAO

ASSOCIAÇÃO DA ELETROCOAGULAÇÃO COM OS SAIS CLORETO DE SÓDIO E CLORETO DE POTÁSSIO PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA

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

Orientadora: Prof[a]. Dr[a]. Joseane Débora Peruço Theodoro.

Coorientador: Paulo Sergio Theodoro.

LONDRINA

2017

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

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

Associação da eletrocoagulação com os sais cloreto de sódio e cloreto de potássio para o tratamento de água

por

Bruno Kenzo Nagao

Monografia apresentada no dia 13 de junho de 2017 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).

_____
Profa. Msa. Isabela Bruna Tavares Machado Bolonhesi
(UTFPR)

_____
Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira
(UTFPR)

_____
Profa. Dra. Joseane Débora Peruço Theodoro
(UTFPR)
Orientadora

_____
Profa. Dra. Edilaine Regina Pereira
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

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

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo amor incondicional e por não medirem esforços em prol do meu futuro, são a razão de eu sempre continuar firme e nunca desistir.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus por sempre me ajudar nesta caminhada e nunca me desamparar nas horas difíceis.

À minha família, irmã e aos meus pais pelo amor, confiança e apoio em todas as decisões ao longo da minha vida, a educação e aos cuidados que tiveram em todos esses anos mesmo que distantes.

À Profa Dra. Joseane Débora Peruço Theodoro pela oportunidade, orientação, apoio e dedicação para a elaboração deste trabalho.

Agradeço a Prof. Dra. Edilaine Regina Pereira e ao Prof. Dr. Paulo Sergio Theodoro pela confiança, conhecimento e enriquecimento no trabalho.

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela formação acadêmica adquirida ao longo dos anos de graduação, a qual espero um dia ter o orgulho de representar no mercado de trabalho como Engenheiro Ambiental.

Aos que se dispuseram a me ajudar no laboratório no período de análises, pelos ensinamentos e conhecimentos repassados por eles.

Sou grato aos meus queridos amigos que fiz durante os anos de graduação, obrigado pelo companherismo e momentos de alegria, por me mostrarem o verdadeiro valor da amizade, vocês jamais serão esquecidos.

RESUMO

NAGAO, B. K. Associação da eletrocoagulação com os sais cloreto de sódio e cloreto de potássio para o tratamento de água. 79 f. 2017. Trabalho de Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2017.

A água é um recurso natural de valor inestimável e deve ser conservada e protegida por todos, logo, é necessário buscar a melhoria contínua do processo de tratamento de água por meio de novas tecnologias, visando à manutenção de uma água de qualidade. O objetivo deste estudo foi avaliar a eficiência da eletrocoagulação com uso dos sais cloreto de sódio (NaCl) e cloreto de potássio (KCl) para o tratamento de água. Foram realizadas duas amostragens: a primeira sem tempo de sedimentação e a segunda com 24 horas de sedimentação. Foram aplicados três tratamentos: eletrocoagulação somente, eletrocoagulação associada ao NaCl e eletrocoagulação associada ao KCl. Os ensaios foram realizados com um reator em escala de bancada, composto por eletrodos de ferro monopolares conectados em paralelo. Os parâmetros cor aparente, turbidez, condutividade elétrica, pH, temperatura e desgaste dos eletrodos foram analisados para todos os ensaios dos três tratamentos aplicados, com a variação da concentração do sal associado e com a variação do tempo de tratamento. Quando feita a adição dos sais, suas concentrações variaram entre 0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 $mg.L^{-1}$. Os tempos de tratamento foram de 20, 40, 60 e 80 minutos. Dentre todos os ensaios envolvendo o NaCl, o NaCl A2 2 (referente ao tratamento da eletrocoagulação associada ao NaCl de concentração de 2,0 $mg.L^{-1}$ da segunda amostragem), foi o responsável pelos melhores resultados, apresentando uma cor aparente de 4,0 $mgPt.Co.L^{-1}$ (95,6% de remoção) e turbidez de 2,9 NTU (91,4% de remoção). Com relação aos ensaios com KCl, o responsável pelos melhores resultados foi o KCl A2 4 (referente ao tratamento da eletrocoagulação associada ao KCl de concentração de 4,0 $mg.L^{-1}$ da segunda amostragem), apresentando uma cor aparente de 28,0 $mgPt.Co.L^{-1}$ (69,2% de remoção) e turbidez de 9,1 NTU (72,8% de remoção). A condutividade elétrica aumentou com a associação dos sais, atingindo o máximo de 180,0 $\mu S.cm^{-1}$ em alguns ensaios nas duas amostragens. A temperatura pouco variou, mantendo constância próxima aos 27 ºC em todos os tratamentos nas duas amostragens. O pH manteve valores próximos ao 7,0 (neutro) em todos os tratamentos nas duas amostragens. O desgaste dos eletrodos apresentou desacordo entre os valores experimentais e teóricos. Conclui-se que, em termos gerais, a associação da eletrocoagulação com os sais NaCl e KCl se mostrou mais eficiente do que o tratamento não associado, alcançando melhores eficiências de remoção para os parâmetros cor aparente e turbidez, logo, uma alternativa sustentável para o tratamento de água.

Palavras-chave: Tratamento de água, eletrocoagulação, cloreto de sódio, cloreto de potássio.

ABSTRACT

NAGAO, B. K. Association of electrocoagulation with the salts sodium chloride and potassium chloride for the water treatment. 79 p. 2017. Gratuadion work in Environmental Engineering, Technological Federal University of Paraná, Londrina, 2017.

Water is a priceless natural resource and it should be conserved and protected by all, therefore, it is interesting to seek for continuous improvement of the water treatment process by means of new technologies, aiming at the maintenance of a quality water. The objective of this study was to evaluate the efficiency of electrocoagulation with the use of the salts sodium chloride (NaCl) and potassium chloride (KCl) for the water treatment. Two samplings were made: the first without sedimentation process and the second one with 24 hours of sedimentation. There were applied three treatments: electrocoagulation only, electrocoagulation associated with NaCl and electrocoagulation associated with KCl. The tests were taken using a bench scale reactor, consisting of monopolar iron electrodes connected in parallel. The parameters apparent color, turbidity, electrical conductivity, pH, temperature and wear of the electrodes were analyzed for all the tests of the three applied treatments, considering the variation of the associated salt concentration and the variation of the treatment time. When added the salts, their concentrations varied between 0; 1.0; 2.0; 3.0; 4.0 and 5.0 $mg.L^{-1}$. The treatment times were 20, 40, 60 and 80 minutes. Among all the tests with NaCl, the NaCl A2 2 (related to the treatment of electrocoagulation associated with 2.0 $mg.L^{-1}$ of NaCl from the second sample), was responsible for the best results, presenting an apparent color of 4.0 $mgPt.Co.L^{-1}$ (95.6% removal) and turbidity of 2.9 NTU (91.4% removal). About the tests involving KCl, the responsible for the best results was the KCl A2 4 (related to the treatment of electrocoagulation associated with 4.0 $mg.L^{-1}$ of KCl from the second sample), presenting an apparent color of 28.0 $mgPt.Co.L^{-1}$ (69.2% removal) and turbidity of 9.1 NTU (72.8% removal). The electrical conductivity increased when associated with the salts, reaching a maximum value of 180,0 $\mu S.cm^{-1}$ in some tests for the two samplings. The temperature had a low variation, maintaining a constancy near 27 ºC in all treatments for the two samplings. The pH maintained values close to 7,0 (neutral) in all treatments for the two samplings. The wear of the electrodes had some disagreements between the experimental and theoretical values. Therefore, it is possbitle to conclude, in general terms, the association of electrocoagulation with NaCl and KCl salts proved to be more efficient than non-associated treatment, achieving better removal efficiencies for the apparent parameter and turbidity, thus a sustainable alternative to the water treatment.

Keywords: Water treatment, electrocoagulation, sodium chloride, potassium chloride.

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Reação de oxidação do ferro no eletrodo anódico.....22
Equação 2 - Reação de formação de hidróxidos de Fe3+ no eletrodo anódico.....22
Equação 3 - Reação de formação de gás hidrogênio no eletrodo catódico 23
Equação 4 - Reação global do mecanismo 1 23
Equação 5 - Reação de oxidação do ferro no eletrodo anódico.....23
Equação 6 - Reação de formação de hidróxidos de Fe2+ no eletrodo anódico.....23
Equação 7 - Reação de formação dos íons OH- no eletrodo catódico.....23
Equação 8 - Reação global do mecanismo 2.....23
Equação 9 - Reação de formação de flocos 23
Equação 10 - Cálculo da eficiência de remoção de cor aparente e turbidez.....38
Equação 11- Cálculo do desgaste do eletrodo: teórico.....38
Equação 12- Cálculo do desgaste do eletrodo: experimental 39

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reator EC em escala de bancada com eletrodos monopolares em paralelo. 22
Figura 2 - Interações que ocorrem dentro de um reator de EC. 24
Figura 3 - Mapa com a localização da ETA do SAMAE em Ibiporã, Paraná. 29
Figura 4 - Laboratório de Poluentes Atmosféricos da UTFPR -Câmpus Londrina. ...30
Figura 5 - Reator de eletrocoagulação em nível de bancada. a) Sistema de eletrodos; b) Recipiente de acrílico; c) Agitador magnético; d) Fonte de corrente elétrica. 31
Figura 6 - Presença de hidróxidos de ferro III em solução. 33
Figura 7 - Fluxograma da primeira amostragem. 34
Figura 8 - Fluxograma da segunda amostragem. 34
Figura 9 - Eficiência de remoção de cor aparente ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a primeira amostragem. 41
Figura 10 - Eficiência de remoção de cor aparente ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a segunda amostragem. 42
Figura 11 - Eficiência de remoção de cor aparente ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a primeira amostragem. 44
Figura 12 - Eficiência de remoção de cor aparente ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a segunda amostragem. 44
Figura 13 - Eficiência de remoção de turbidez ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a primeira amostragem. 46
Figura 14 - Eficiência de remoção de turbidez ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a segunda amostragem. 46
Figura 15 - Eficiência de remoção de turbidez ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a primeira amostragem. 48
Figura 16 - Eficiência de remoção de turbidez ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a segunda amostragem. 49
Figura 17 - (a) Reator durante o tratamento da eletrocoagulação; (b) Reator depois de 24 horas de sedimentação. 50

Figura 18 - Comportamento dos valores da condutividade elétrica ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a primeira amostragem. 51
Figura 19 - Comportamento dos valores da condutividade elétrica ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a segunda amostragem. 51
Figura 20 - Comportamento dos valores da condutividade elétrica ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a primeira amostragem. 53
Figura 21 - Comportamento dos valores da condutividade elétrica ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a segunda amostragem. 53
Figura 22 - Comportamento dos valores da temperatura ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a primeira amostragem. 55
Figura 23 - Comportamento dos valores da temperatura ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a segunda amostragem. 55
Figura 24 - Comportamento dos valores da temperatura ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a primeira amostragem. 56
Figura 25 - Comportamento dos valores da temperatura ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a segunda amostragem. 57
Figura 26 - Comportamento dos valores médios do pH ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a primeira amostragem. 58
Figura 27 - Comportamento dos valores do pH ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a segunda amostragem. 59
Figura 28 - Comportamento dos valores do pH ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a primeira amostragem. 60
Figura 29 - Comportamento dos valores do pH ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a segunda amostragem. 61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividade versus concentração de cloreto de sódio. 26
Tabela 2 - Parâmetros de potabilidade da água.....27
Tabela 3 - Parâmetros para águas doces e de Classe 2. 28
Tabela 4 - Relação entre o percentual de salinidade e as concentrações de NaCl e de KCl na solução ($mg.L^{-1}$).....32
Tabela 5 - Tratamento, ensaio e concentração de sal. 32
Tabela 6 - Parâmetro, equipamento e metodologia. 35
Tabela 7 - Primeira amostragem: planejamento dos parâmetros.....36
Tabela 8 - Segunda amostragem: planejamento dos parâmetros.....37
Tabela 9 - Valores dos parâmetros da amostra bruta de água para a primeira amostragem. 40
Tabela 10 - Valores dos parâmetros da amostra bruta de água para a segunda amostragem. 40
Tabela 11 - Valores dos desgastes dos eletrodos após os tratamentos para a primeira amostragem. 62
Tabela 12 - Valores dos desgastes dos eletrodos após os tratamentos para a segunda amostragem.....63

LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

A	Ampère
cm	Centímetro
C_i	Valor inicial de cor aparente
C_f	Valor final de cor aparente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
EC	Eletrocoagulação
EC A1	Ensaio referente à eletrocoagulação da primeira amostragem
EC A2	Ensaio referente à eletrocoagulação da segunda amostragem
E_{cor}	Eficiência de remoção de cor aparente
$E_{turbidez}$	Eficiência de remoção de turbidez
ETA	Estação de Tratamento de Água
F	Constante de Faraday
Fe	Ferro
$Fe(OH)_3$	Hidróxido de Ferro III
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
g	Grama
ºC	Graus Celsius
i	Corrente elétrica
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
KCl	Cloreto de potássio
KCl A1 1	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao KCl com a concentração de 1,0 $mg.L^{-1}$ da primeira amostragem
KCl A1 2	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao KCl com a concentração de 2,0 $mg.L^{-1}$ da primeira amostragem
KCl A1 3	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao KCl com a concentração de 3,0 $mg.L^{-1}$ da primeira amostragem
KCl A1 4	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao KCl com a concentração de 4,0 $mg.L^{-1}$ da primeira amostragem
KCl A1 5	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao KCl com a concentração de 5,0 $mg.L^{-1}$ da primeira amostragem
KCl A2 1	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao KCl com a

	concentração de 1,0 $mg.L^{-1}$ da segunda amostragem
KCl A2 2	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao KCl com a concentração de 2,0 $mg.L^{-1}$ da segunda amostragem
KCl A2 3	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao KCl com a concentração de 3,0 $mg.L^{-1}$ da segunda amostragem
KCl A2 4	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao KCl com a concentração de 4,0 $mg.L^{-1}$ da segunda amostragem
KCl A2 5	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao KCl com a concentração de 5,0 $mg.L^{-1}$ da segunda amostragem
L	Litro
M	Massa molar do elemento predominante do eletrodo
m_e	Massa do eletrodo dissolvido
m_i	Massa inicial do eletrodo
m_f	Massa final do eletrodo
mg	Miligrama
$mg.L^{-1}$	Miligrama por Litro
$mg.PtCo.L^{-1}$	Miligrama de Platina-Cobalto por Litro
min	Minuto
n	Número de elétrons da reação de oxidação do eletrodo anódico
NA	Não aplicável
NaCl	Cloreto de Sódio
NaCl A1 1	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao NaCl com a concentração de 1,0 $mg.L^{-1}$ da primeira amostragem
NaCl A1 2	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao NaCl com a concentração de 2,0 $mg.L^{-1}$ da primeira amostragem
NaCl A1 3	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao NaCl com a concentração de 3,0 $mg.L^{-1}$ da primeira amostragem
NaCl A1 4	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao NaCl com a concentração de 4,0 $mg.L^{-1}$ da primeira amostragem
NaCl A1 5	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao NaCl com a concentração de 5,0 $mg.L^{-1}$ da primeira amostragem
NaCl A2 1	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao NaCl com a concentração de 1,0 $mg.L^{-1}$ da segunda amostragem

NaCl A2 2	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao NaCl com a concentração de 2,0 $mg.L^{-1}$ da segunda amostragem
NaCl A2 3	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao NaCl com a concentração de 3,0 $mg.L^{-1}$ da segunda amostragem
NaCl A2 4	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao NaCl com a concentração de 4,0 $mg.L^{-1}$ da segunda amostragem
NaCl A2 5	Ensaio referente à eletrocoagulação associada ao NaCl com a concentração de 5,0 $mg.L^{-1}$ da segunda amostragem
NTU	Nefelometric Turbidity Unit
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PVC	Policloreto de Polivinila
SAMAE	Serviço Autônome Municipal de Água e Esgoto
µS	Microsiemens
SUREHMA	Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente
t	Tempo (min)
T_i	Valor inicial de turbidez
T_f	Valor final de turbidez
uH	Unidade Hazen
uT	Unidade de Turbidez
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
V	Volts
VMP	Valor Máximo Permitido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
2 OBJETIVOS 18
2.1 Objetivo geral 18
2.2 Objetivos específicos 18
3 REFERENCIAL TEÓRICO 19
3.1 A água, sua importância e problemática 19
3.2 Processos de tratamento de água 20
3.2.1. Eletrocoagulação 20
3.2.2. Mecanismos dos processos de eletrocoagulação 22
3.2.3. Aplicações da eletrocoagulação para o tratamento de água 24
3.3 Parâmetros associados ao processo eletrolítico 25
3.3.1. Condutividade elétrica 25
3.3.2. Presença de sais na água 25
3.3.3. Desgaste do eletrodo 27
3.4 Legislação 27
3.4.1. Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde 27
3.4.2. Resolução CONAMA nº 357/2005 27
4 MATERIAL E MÉTODOS 29
4.1 Local de coleta 29
4.2 Local de ensaio 29
4.3 Etapas do experimento 30
4.3.1. O reator de eletrocoagulação 30
4.3.2. Preparação das soluções salinas de NaCl e KCl 31
4.3.3. Tratamentos 32
4.3.4. Análises dos parâmetros 34
4.3.5. Cálculo da eficiência de remoção de cor aparente e turbidez 38
4.3.6. Cálculo do desgaste do eletrodo 38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 40
5.1 Parâmetros da amostra bruta de água 40
5.2 Cor Aparente 41

5.2.1. Cor aparente para a EC associada ao NaCl 41
5.2.2. Cor aparente para a EC associada ao KCl 43
5.3 Turbidez 45
5.3.1. Turbidez para a EC associada ao NaCl 45
5.3.2. Turbidez para a EC associada ao KCl 48
5.4 Condutividade elétrica 50
5.4.1. Condutividade elétrica para a EC associada ao NaCl 50
5.4.2. Condutividade elétrica para a EC associada ao KCl 52
5.5 Temperatura 54
5.5.1. Temperatura para a EC associada ao NaCl 54
5.5.2. Temperatura para a EC associada ao KCl 56
5.6 pH 57
5.6.1. pH para a EC associada ao NaCl 58
5.6.2. pH para a EC associada ao KCl 60
5.7 Desgaste dos eletrodos 62
6 CONCLUSÃO 64
REFERÊNCIAS 65
APÊNDICES 69

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de valor inestimável, de fundamental importância para a manutenção da vida de todas as espécies e deve ser conservada e protegida por todos. A água possui uma vasta utilização na sociedade, indo desde o uso doméstico até os mais diversos fins industriais e agrícolas (ONU, 2015).

Conforme a Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde (2011), toda água destinada ao consumo humano deve ser objeto de controle e vigilância da qualidade. Com isso, a água não deve oferecer riscos à saúde humana, e portanto, deve obedecer aos parâmetros físicos, químicos, microbiológicos e radioativos, atendendo ao padrão de potabilidade.

Desta forma, torna-se interessante a busca da melhoria contínua do processo da Estação de Tratamento de Água (ETA) por meio de novas tecnologias, visando à manutenção de uma água de qualidade, em respeito sempre aos parâmetros exigidos pela Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde (2011).

A eletrocoagulação aparece então como uma alternativa ao processo convencional de coagulação, é considerada como uma tecnologia competitiva para a remoção de poluentes para o tratamento da água (CAÑIZARES et al., 2008). Basicamente, são utilizados eletrodos metálicos com uma corrente elétrica contínua para a formação de hidróxidos metálicos, os quais atuam como agentes coagulantes (THEODORO, 2010). Ainda, é capaz fornecer a quantidade necessária do coagulante, ou seja, uma dosagem mais controlada (MARCOLINIO et al., 2015).

Visando potencializar o desempenho da eletrocoagulação, a introdução de compostos salinos na água é interessante: os sais são capazes de melhorar a eficiência de remoção do parâmetro cor aparente e turbidez. Neste contexto, o presente trabalho aborda a possibilidade do uso da eletrocoagulação com o eletrodo de ferro para o tratamento de água proveniente do Rio Jacutinga para estudar a influência da adição dos sais cloreto de potássio (KCl) e cloreto de sódio (NaCl).

Segundo Mollah et al. (2004), a adição de cloreto de sódio (NaCl) à eletrocoagulação proporcionou a eficiência de 98% para a remoção do corante laranja. Sobre o KCl, Poe (2010) aponta-o como uma alternativa ao NaCl, já que este sal é capaz de gerar menos impactos ambientais causados da descarga de salmoura, sendo considerado um nutriente para as plantas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar a eficiência da associação da eletrocoagulação com os sais cloreto de sódio (NaCl) e cloreto de potássio (KCl) para o tratamento de água.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar a remoção dos parâmetros cor aparente e turbidez da água e acompanhar os parâmetros temperatura, condutividade elétrica e pH durante o processo da eletrocoagulação com a adição do sal cloreto de sódio (NaCl) e também com a adição do sal cloreto de potássio (KCl);
- Comparar a eficiência entre o processo da eletrocoagulação com a adição do sal cloreto de sódio (NaCl) e com a adição do sal cloreto de potássio (KCl);
- Avaliar o desempenho dos eletrodos de ferro arranjados em paralelo por meio do cálculo de perda de massa durante o processo de eletrocoagulação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 A água, sua importância e problemática

A água, recurso natural de valor inestimável, é indispensável desde a produção de alimentos e energia até a preservação da saúde humana, contribuindo para o bem-estar social de bilhões de pessoas.

> A água potável limpa, segura e adequada é vital para a sobrevivência de todos os organismos vivos e para o funcionamento dos ecossistemas, comunidades e economias. Mas a qualidade da água em todo o mundo é cada vez mais ameaçada à medida que as populações humanas crescem, atividades agrícolas e industriais se expandem e as mudanças climáticas ameaçam alterar o ciclo hidrológico global. (ONU, 2010, DECLARAÇÃO PARA O DIA MUNDIAL DA ÁGUA)

Muito se tem falado acerca da disponibilidade da água potável, que a mesma deve estar disponível em quantidade e qualidade suficientes para todos. Entretanto, a limitação da disponibilidade de água limpa é uma problemática atual e motivo de estudos por especialistas da área, tanto que, ambientalistas comprovaram que a escassez de água doce para o consumo humano ocorrerá ainda neste século (PAVANELLI, 2001).

O desenvolvimento econômico mundial, acompanhado do acelerado crescimento populacional, têm como uma das consequências o consumo dos recursos hídricos, aumentando assim a demanda pela água potável e limitando cada vez mais a sua disponibilidade. De acordo com informações da Organização das Nações Unidas (ONU, 2010), estima-se que mais de um bilhão de pessoas carece de acesso a um abastecimento de água suficiente.

Ainda, de acordo com o Relatório do Desenvolvimento Mundial da Água (ONU, 2015), esta crise de caráter global é causada pela crescente demanda dos recursos hídricos, os quais devem atender aos caminhos do desenvolvimento não sustentável: crescimento populacional, urbanização, políticas de segurança alimentar e processos macroeconômicos, como a globalização e mudanças nos padrões de consumo, afetando assim a qualidade dos recursos hídricos.

Contextualizando para o cenário brasileiro, de acordo com as informações do Atlas de Saneamento 2011 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), em 2008, 90,6% dos municípios brasileiros passaram por alguma melhoria em seu

processo de abastecimento de água, percentual este muito superior quando comparado aos 59,1% em 2000.

Entretanto, este progresso no abastecimento de água não era acompanhado de uma melhoria na qualidade da água. Ainda, considerando as informações do Atlas de Saneamento 2011, cerca de 25,6% da água distribuídaà população na Região Norte não recebia nenhumtipo de tratamento, valor muito superior aos 7,1% da média nacional no mesmo período.

Segundo dados de pesquisa da FUNASA (2017), com relação ao abastecimento de água, 93,94% dos domicílios pertencentes aos centros urbanos eram abastecidos diretamente pela rede, enquanto que, em zonas rurais, este índice era de apenas 34,51%.

Desta forma, considerando esta divergência do cenário brasileiro, torna-se importante o incentivo à pesquisa na área de saneamento, focando principalmente em alternativas que proporcionem a redução dos custos, tornando, portanto, mais igual o acesso à água tratada e de qualidade em todo o país. Para tanto, como alternativa à etapa da coagulação convencional, surge a eletrocoagulação, a qual tem se mostrado como uma das alternativas mais promissoras. Estudos recentes apresentaram resultados positivos da eletrocoagulação com relação a alguns parâmetros, principalmente quanto à remoção de cor aparente e turbidez.

3.2 Processos de tratamento de água

3.2.1. Eletrocoagulação

O mecanismo de remoção de poluentes começa com o ânodo metálico de sacrífico, o qual atua como agente coagulante na água, em outras palavras, a eletrocoagulação (EC) introduz cátions metálicos *in situ*, ao invés da dosagem externa feita usualmente com coagulantes inorgânicos (HOLT et al., 2002). Esta técnica consegue substituir o uso dos coagulantes convencionais, ou reduzir a dosagem destes, de forma mais controlada, fornecendo a quantidade necessária do coagulante (MARCOLINIO et al., 2015).

Para Bensadok et al. (2007), a EC inicia com a oxidação dos ânodos de sacrifício, esta reação proporciona a liberação de íons metálicos, os quais, quando combinados aos íons hidroxila, formam hidróxidos metálicos. Estes, por sua vez,

desestabilizam e agregam as partículas suspensas, promovendo então a remoção dos poluentes.

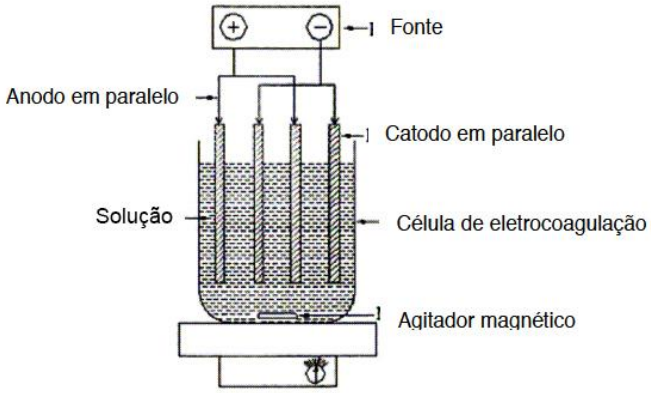
Em conformidade com Mollah et al. (2001), o reator de EC é em sua essência, uma pilha eletroquímica, em outros termos, consiste de uma célula eletrolítica composta por um ânodo e um cátodo. Quando conectados a uma fonte externa de energia, o ânodo de sacrifício tende a se corroer eletroquimicamente devido à oxidação, adicionando portanto o agente coagulante *in situ*.

Embora exija certo conhecimento técnico para a exploração de todo seu potencial, a eletrocoagulação encontrou um nicho nos processos de tratamento de água, sendo o reator de EC feito em pequena escala, uma tecnologia viável, de confiança e eficaz (HOLT et al., 2002). Segundo o mesmo autor, não há atualmente nenhum reator dominante de EC, em outras palavras, os reatores são ajustados para servir a uma aplicação específica, de acordo com as variáveis do projeto em questão.

Mollah et al. (2001), ressaltam várias vantagens da eletrocoagulação com relação à coagulação química convencional, dentre elas, tem-se a simplicidade e o fácil manuseio do equipamento utilizado; os flocos formados pela EC são maiores e mais estáveis, logo, a separação por filtração torna-se mais rápida; por fim, o lodo formado pela EC, por conter principalmente óxidos/hidróxidos metálicos, tende a se depositar mais facilmente.

Holt et al. (2002), relatam o potencial de uso da eletrocoagulação com relação à qualidade de água. A EC é capaz de remover uma grande variedade de poluentes, incluindo metais pesados, corantes, matéria orgânica, gorduras, óleos, dentre outros. A Figura 1 apresenta o reator de eletrocoagulação com eletrodos de ferro semelhante ao proposto por Mollah et al. (2001).

Figura 1 - Reator EC em escala de bancada com eletrodos monopolares em paralelo.



Fonte: MOLLAH et al. (2001).

3.2.2. Mecanismos dos processos de eletrocoagulação

Em conformidade com Mollah et al. (2001), os mecanismos de EC são altamente dependentes das propriedades químicas da solução aquosa a ser tratada. Segundo o autor, a condutividade elétrica, o pH e a concentração dos constituintes químicos influenciam o desempenho do processo de EC.

Ainda, segundo Mollah et al. (2001), a eletrocoagulação, em termos gerais, ocorre de acordo com as seguintes etapas: (i) formação de coagulantes pela oxidação eletrolítica do eletrodo de sacrifício; (ii) desestabilização dos contaminantes, das partículas em suspensão e quebra das emulsões e (iii) agregação das fases desestabilizadas, formando flocos. Para o caso dos ânodos de ferro, a oxidação do ferro produz hidróxidos de ferro, $Fe(OH)_n$, sendo n = 2 ou 3. A produção de hidróxidos de ferro ocorre conforme os dois mecanismos apresentadosnas Equações 1 a 8.

Mecanismo 1

Reação de oxidação do ferro no eletrodo anódico.

$$4Fe_{(s)} \rightarrow 4Fe^{2+}_{(aq)} + 8e^{-} \quad (1)$$

Reação de formação de hidróxidos de Fe^{3+} no eletrodo anódico.

$$4Fe^{2+}_{(aq)} + 10H_2O_{(l)} + O_{2(g)} \rightarrow 4Fe(OH)_{3(s)} + 8H^{+}_{(aq)} \quad (2)$$

Reação de formação de gás hidrogênio no eletrodo catódico.

$$8H^{+}_{(aq)} + 8e^{-} \rightarrow 4H_{2(g)} \quad (3)$$

Reação global do mecanismo 1.

$$4Fe_{(s)} + 10H_2O_{(l)} + O_{2(g)} \rightarrow 4Fe(OH)_{3(s)} + 4H_{2(g)} \quad (4)$$

Mecanismo 2

Reação de oxidação do ferro no eletrodo anódico.

$$Fe_{(s)} \rightarrow Fe^{2+}_{(aq)} + 2e^{-} \quad (5)$$

Reação de formação de hidróxidos de Fe^{2+} no eletrodo anódico.

$$Fe^{2+}_{(aq)} + 2\ OH^{-}_{(aq)} \rightarrow Fe(OH)_{2(s)} \quad (6)$$

Reação de formação dos íons OH^{-} no eletrodo catódico.

$$2\ H_2O_{(L)} + 2e^{-} \rightarrow H_{2(g)} + 2\ OH^{-}_{(aq)} \quad (7)$$

Reação global do mecanismo 2.

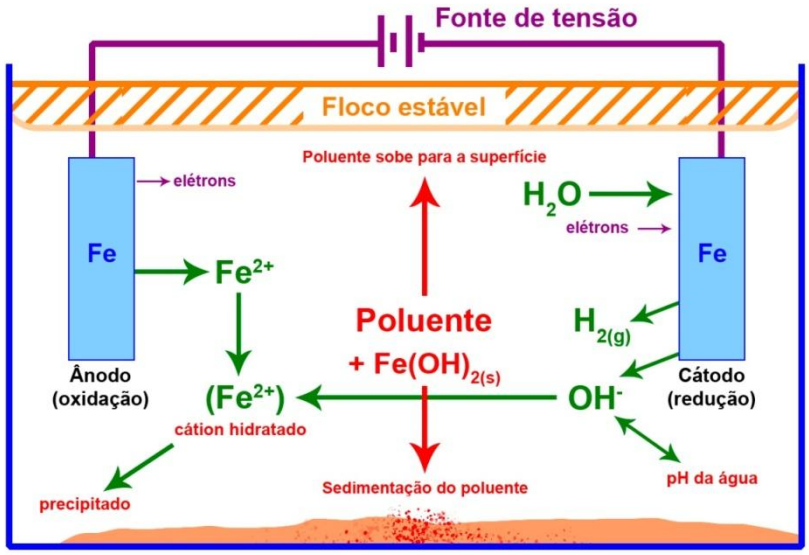
$$Fe_{(s)} + 2H_2O_{(l)} \rightarrow Fe(OH)_{2(s)} + H_{2(g)} \quad (8)$$

Os hidróxidos de ferro permanecem na solução como um material gelatinoso em suspensão, o qual tem a capacidade de remover os poluentes por complexação ou por atração eletrostática, seguida de coagulação. Em seguida, na superfície de complexação, o poluente age como uma espécie de ligante químico (L), capaz de se combinar com o hidróxido de ferro formando os flocos (MOLLAH et al., 2001), conforme a Equação 9.

$$L - H_{(aq)}(OH)OFe_{(s)} \rightarrow L - OFe_{(s)} + H_2O_{(l)} \quad (9)$$

Por fim, de acordo com Theodoro (2010), o processo de EC é complexo, pois engloba fenômenos químicos e físicos que ocorrem de forma simultânea. A Figura 2, proposta por Holt et al. (2002) ilustra os mecanismos envolvidos na eletrocoagulação, apresentando as inúmeras interações do poluente com as espécies iônicas presentes no meio aquoso.

Figura 2 - Interações que ocorrem dentro de um reator de EC.



Fonte: HOLT et al. (2002).

3.2.3. Aplicações da eletrocoagulação para o tratamento de água

Holt (2002) investigou a aplicação da eletrocoagulação no tratamento de água, avaliando alguns parâmetros, dentre eles, a turbidez, condutividade elétrica e a carga de poluentes presentes na solução. Para a realização de seus experimentos, utilizou uma amostra de água deionizada com um poluente de argila, em concentrações variadas, a qual conferia turbidez à amostra quando disperso em solução. Uma das concentrações do poluente de argila era de 0,8 $g.L^{-1}$. Para melhor avaliação deste parâmetro, o autor dividiu o processo em três fases: a fase de latência, a fase reativa, e a fase de estabilização. Depois de realizado o experimento, constatou-se que a turbidez foi removida em 95% durante a fase reativa, reduzindo assim para um valor muito próximo de zero, ou seja, a EC foi eficiente para a remoção deste parâmetro.

Jiang et al. (2002) aplicaram também a eletrocoagulação para o tratamento de água, utilizando um reator de EC composto por eletrodos de alumínio. Neste estudo, os autores avaliaram o desempenho da EC quando associada à coagulação convencional para o tratamento de água. Com base nos resultados obtidos, a coagulação convencional, quando combinada ao processo de EC, apresentou um desempenho superior: a remoção de carbono orgânico dissolvido (COD) foi 20% maior.

Ferrareze (2016) estudou sobre a aplicação da eletrocoagulação associada ao uso de coagulantes orgânicos e inorgânicos para o tratamento de água. De acordo com os resultados obtidos, a aplicação que apresentou melhor resultado foi a EC em conjunto com 25 $mg.L^{-1}$ de cloreto férrico, com 0,5 A de corrente elétrica e tempo de reação de 20 minutos, alcançando 81,32% de remoção de cor aparente e 96,48% de remoção do parâmetro turbidez.

Iwamura (2016) aplicou a eletrocoagulação associada ao coagulante natural *Moringa oleifera* e ao agente coagulante sulfato de alumínio, para a redução dos parâmetros físico-químicos da água, este tratamento mostrou-se eficiente para uma corrente de 0,2 A e uma voltagem de 11,4 V, removendo cerca de 47% para o parâmetro cor aparente e 92% para a turbidez.

3.3 Parâmetros associados ao processo eletrolítico

3.3.1. Condutividade elétrica

> A condutividade é a expressão numérica da capacidade da água ou meio aquoso em conduzir a corrente elétrica. Depende das concentrações iônicas e a temperatura é uma indicaçãoda quantidade de sais existentes na coluna d'água e, portanto, representa uma medida indireta da concentração de poluentes. Em geral, níveis superiores a 100 µS/cm indicam ambientes impactados. (CETESB, 2009)

Segundo Libânio (2010), condutividade elétrica representa a capacidade da água para conduzir corrente elétrica, considerando a presença de substâncias dissolvidas que se dissociam em ânions e cátions, formando partículas.

Para Saroha et al. (2013), a eficiência do processo de eletrocoagulação depende de alguns parâmetros operacionais, dentre eles, o autor destaca a importância da condutividade elétrica, pois este parâmetro está diretamente relacionado com o custo operacional e a eficiência de remoção do poluente.

3.3.2. Presença de sais na água

Daneshvar et al. (2006) afirmam que a presença de sais em uma amostra de água aumenta a condutividade elétrica, afetando a passagem da corrente, a tensão da célula e o consumo de energia elétrica nas células eletrolíticas. Portanto, os

compostos de sais estão diretamente relacionados ao desempenho da eletrocoagulação. Outra vantagem, apresentada pelos autores, é de que os íons cloretos são capazes de reduzir os efeitos adversos de outros ânions.

Em geral, visando aumentar a condutividade, o cloreto de sódio é uma boa opção, principalmente por se tratar de um produto de baixo custo e não apresentar toxicidade. Em contrapartida, quando em altas concentrações, este sal libera grande quantidade de íons cloreto, formando então compostos organoclorados de toxicidade considerável (THEODORO, 2010).

Mollah et al. (2004) investigaram a eficiência da aplicação da EC combinada à adição de cloreto de sódio para a remoção de solução de corante laranja. Com base nos resultados apresentados, o aumento da condutividade elétrica, devido à concentração do cloreto de sódio em solução, proporcionou melhora na eficiência de remoção do corante laranja: a eficiência máxima de remoção, cerca de 98%, foi obtida com a utilização da máxima concentração de NaCl em solução, de 0,102 M.

Em conformidade com Holt et al. (2002), a adição do cloreto de sódio contribui para o aumento da condutividade elétrica, melhorando o desempenho da eletrocoagulação. Em contrapartida, em concentrações baixas de NaCl, observou-se a resposta mais lenta de remoção da turbidez, devido à redução da condutividade elétrica, exigindo portanto, uma potência maior da fonte de energia, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Condutividade versus concentração de cloreto de sódio.

Condutividade ($\mu S.cm^{-1}$)	**NaCl ($g.L^{-1}$)**	**Voltagem (V)**	**Corrente elétrica (A)**
17	0	24	0,35
48	0,015	24	0,60
90	0,031	24	1,30
350	0,15	7	2,0
660	0,32	3	2,0

Fonte:HOLT *et al.*, 2002.

Com relação ao uso do cloreto de potássio, Poe (2010) constatou que este pode ser uma alternativa do uso do cloreto de sódio, devido ao fato de diminuir os impactos ambientais causados da descarga de salmoura, já que o KCl é considerado um nutriente para a saúde humana e das plantas.

3.3.3. Desgaste do eletrodo

Para que ocorra o processo de eletrocoagulação, os eletrodos metálicos devem sofrer reações de oxidação e redução, demandando assim certa quantidade de massa destes eletrodos, injetando o agente coagulante *in situ*.

De acordo com Mollah et al. (2004), a massa consumida dos eletrodos depende da quantidade de eletricidade que passa pela solução eletrolítica. Entretanto, a geometria do eletrodo e as condições de operação da célula de EC são capazes de influenciar na massa consumida pelo tratamento.

3.4 Legislação

3.4.1. Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde

Com relação à água destinada ao consumo humano, é a Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde que fundamenta o padrão de potabilidade, ou seja, a água, para ser potável, não deve oferecer riscos à saúde humana. A Tabela 2 apresenta alguns parâmetros físicos e químicos com os Valor Máximo Permitido (VMP).

Tabela 2 - Parâmetros de potabilidade da água.

Parâmetros	**Valor Máximo Permitido**
Cor aparente	15 uH (mg $PtCo.L^{-1}$)
Turbidez	5 NTU
pH	6,0 a 9,5
Temperatura	NA(1)
Condutividade elétrica	NA(1)

Fonte: Portaria nº 2914/11.
Nota(1): NA = Não aplicável.

Ainda, de acordo com a Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde, não há um valor máximo permitido para o parâmetro temperatura no que diz respeito à água voltada ao consumo humano.

3.4.2. Resolução CONAMA nº 357/2005

Com base na Portaria nº 3/1991 da Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (SUREHMA), os cursos d'água da Bacia do Tibagi se enquadram como água doce e de Classe 2. Desta forma, segundo as definições e classificações estabelecidas pela Resolução CONAMA 357/05, esta água pode ser utilizada para o abastecimento público após tratamento convencional, com os parâmetros apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros para águas doces e de Classe 2.

Parâmetros	**Valor Máximo Permitido**
Cor aparente	NA
Turbidez	Até 100 NTU
pH	5,0 a 9,0
Temperatura	NA(1)
Condutividade elétrica	NA(1)

Fonte: Resolução CONAMA nº 357/2005.
Nota (1): NA = Não aplicável.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local de coleta

Para este trabalho, foram utilizadas amostras de água provenientes da Estação de Tratamento de Água (ETA) do Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE), no município de Ibiporã, Paraná. A localização da ETA apresenta-se na Figura 3.

Figura 3 - Mapa com a localização da ETA do SAMAE em Ibiporã, Paraná.

Fonte: GOOGLE EARTH PRO (2016).

O ponto escolhido para a coleta das amostras foi na entrada do sistema de tratamento de água do SAMAE. Para isto, foram utilizadas duas bombonas de 20 litros, as quais foram previamente higienizadas.

A primeira e a segunda coletas de água foram realizadas nos dias 13 de dezembro de 2016 e 7 de abril de 2017, respectivamente.

Com relação ao armazenamento das amostras, as bombonas foram devidamente fechadas para a realização dos posteriores ensaios.

4.2 Local de ensaio

Todos os ensaios e análises de parâmetros foram realizadas no Laboratório de Poluentes Atmosféricos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Câmpus Londrina, conforme mostrado na Figura 4. Os parâmetros analisados neste estudo foram obtidos com o uso dos materiais e instrumentos disponíveis no laboratório.

Figura 4 - Laboratório de Poluentes Atmosféricos da UTFPR -Câmpus Londrina.

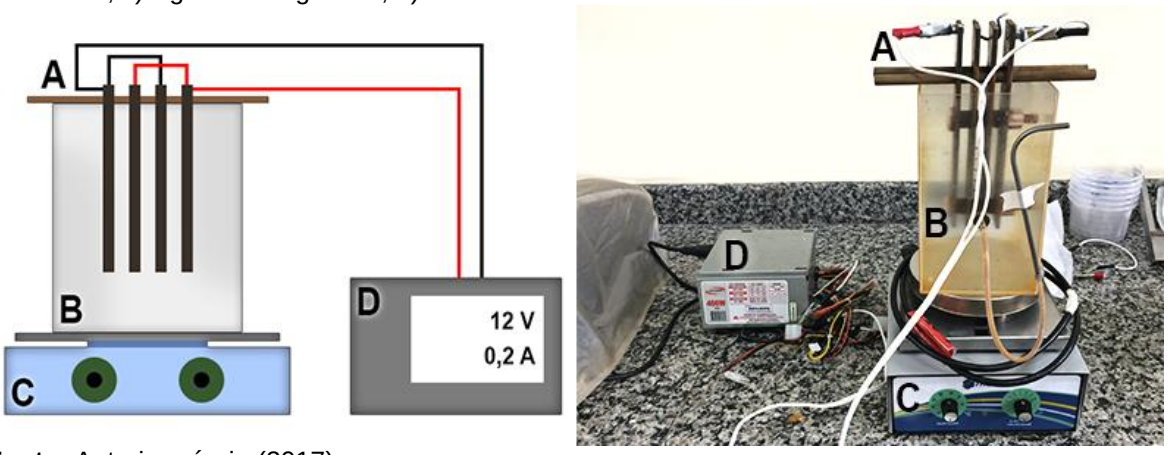
Fonte: Autoria própria (2017).

4.3 Etapas do experimento

4.3.1. O reator de eletrocoagulação

Para este estudo, utilizou-se o reator de eletrocoagulação baseado no modelo proposto por Theodoro (2010) e elaborado por Ferrareze (2016) e Iwamura (2016). Em suma, o reator de EC é formado por um recipiente de acrílico, o sistema de eletrodos de ferro, o agitador magnético e a fonte externa de corrente continua. A Figura 5 apresenta o reator completo de EC em operação.

Figura 5 - Reator de eletrocoagulação em nível de bancada. a) Sistema de eletrodos; b) Recipiente de acrílico; c) Agitador magnético; d) Fonte de corrente elétrica.



Fonte: Autoria própria (2017).

Com relação ao sistema de eletrodos, estes são monopolares e dispostos em paralelo, ou seja, quatro placas de ferro equidistantes, formando assim dois pares de eletrodos. Estas placas possuem 20 cm de altura, 5 cm de largura, 0,3 cm de espessura e são fixadas por parafusos de policloreto de polivinila (PVC). Ainda, foram utilizados conectores fixados com parafuso metálico e fio de cobre de 4mm para interligar as placas de mesma polaridade.

A fonte de alimentação utilizada é da marca Bluecase, capaz de fornecer uma tensão elétrica de 12 V para a passagem de corrente elétrica de 0,20 A pelo fluído. Para o sistema de agitação magnética, foi utilizado o agitador da marca Thelga.

4.3.2. Preparação das soluções salinas de NaCl e KCl

Para este trabalho, analisou-se o efeito da concentração do cloreto de sódio (NaCl) e do cloreto de potássio (KCl) sobre a condutividade elétrica.

A solução contendo NaCl foi preparada obedecendo aos limites dispostos pela Resolução CONAMA 357/05, a qual propõe uma salinidade máxima de 0,5%. Nas duas amostragens, foram feitos cinco ensaios com percentuais de NaCl variando de 0,1% a 0,5%, esta relação está apresentada na Tabela 4.

A solução contendo KCl foi preparada de forma semelhante à solução de NaCl, seguindo a Resolução CONAMA 357/05, a qual estabelece o valor de salinidade máxima de 0,5% em águas doces.

Tabela 4 - Relação entre o percentual de salinidade e as concentrações de NaCl e de KCl na solução ($mg.L^{-1}$).

Percentual de salinidade	Concentração de NaCl na água	Concentração de KCl na água
0,0%	0 $mg.L^{-1}$	0 $mg.L^{-1}$
0,1%	1 $mg.L^{-1}$	1 $mg.L^{-1}$
0,2%	2 $mg.L^{-1}$	2 $mg.L^{-1}$
0,3%	3 $mg.L^{-1}$	3 $mg.L^{-1}$
0,4%	4 $mg.L^{-1}$	4 $mg.L^{-1}$
0,5%	5 $mg.L^{-1}$	5 $mg.L^{-1}$

Fonte: Autoria própria (2017).

4.3.3. Tratamentos

Para este estudo, foram aplicados três tratamentos diferentes: a eletrocoagulação sem a adição de sal, a eletrocoagulação associada ao cloreto de sódio (NaCl) e a eletrocoagulação associada ao cloreto de potássio (KCl). Todos os tratamentos tiveram a duração de 80 minutos com a aplicação de uma corrente de 0,20 A e voltagem de 12 V constantes. Visando ao cumprimento da Resolução CONAMA 357/05, foram utilizadas concentrações salinas até 5 $mg.L^{-1}$.Todos os tratamentos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Tratamento, ensaio e concentração de sal.

Tratamento	Ensaio da primeira amostragem	Ensaio da segunda amostragem	Concentração de sal
Eletrocoagulação sem a adição de sal	EC A1	EC A2	0 $mg.L^{-1}$
Eletrocoagulação associada ao cloreto de sódio (NaCl)	NaCl A1 1	NaCl A2 1	1 $mg.L^{-1}$
	NaCl A1 2	NaCl A2 2	2 $mg.L^{-1}$
	NaCl A1 3	NaCl A2 3	3 $mg.L^{-1}$
	NaCl A1 4	NaCl A2 4	4 $mg.L^{-1}$
	NaCl A1 5	NaCl A2 5	5 $mg.L^{-1}$
Eletrocoagulação associada ao cloreto de potássio (KCl)	KCl A1 1	KCl A2 1	1 $mg.L^{-1}$
	KCl A1 2	KCl A2 2	2 $mg.L^{-1}$
	KCl A1 3	KCl A2 3	3 $mg.L^{-1}$
	KCl A1 4	KCl A2 4	4 $mg.L^{-1}$
	KCl A1 5	KCl A2 5	5 $mg.L^{-1}$

Fonte: Autoria própria (2017).

Inicialmente, foi proposta a realização de apenas uma amostragem para este estudo, entretanto, os resultados apresentados foram insatisfatórios: valores exorbitantes para os parâmetros cor aparente e turbidez e percentuais negativos de eficiência de remoção para ambos.

A adição dos sais, tanto para o caso do NaCl quanto para o KCl, aumentou a condutividade elétrica, provocando a liberação em excesso de hidróxidos de ferro III ($Fe(OH)_3$), os quais apresentam uma coloração castanho-avermelhada, conforme descrito por Patnaik (2003), influenciando na medição do parâmetro cor aparente, pois eles ainda estavam em suspensão devido à agitação magnética, prejudicando então os resultados encontrados. Este fato pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Presença de hidróxidos de ferro III em solução.

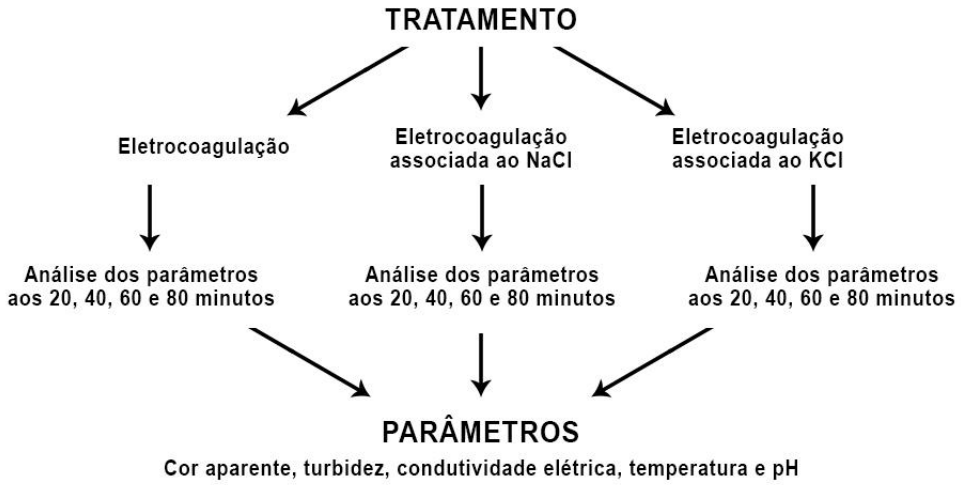
Fonte: Autoria própria (2017).

Desta forma, foi proposta uma segunda amostragem para contornar este problema, utilizando o tempo de sedimentação de 24 horas, ou seja, a coleta das amostras ocorreu igual à primeira amostragem, aos 20, 40, 60 e 80 minutos de tratamento, porém desta vez as análises dos parâmetros foram feitas 24 horas após as coletas, possibilitanto a sedimentação dos $Fe(OH)_3$, os quais se encontravam antes suspensos.

As medições desta segunda amostragem foram realizadas com o auxílio da pipeta graduada, coletando apenas o material sobrenadante de modo a evitar ao máximo o material sedimentado, para que este não influenciasse negativamente os resultados desta amostragem.

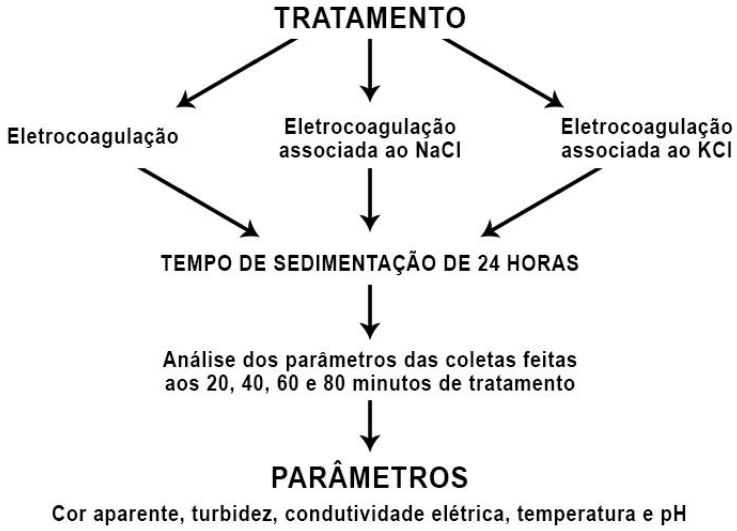
As Figuras 7 e 8 apresentam em forma de fluxograma as duas amostragens deste estudo.

Figura 7 - Fluxograma da primeira amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 8 - Fluxograma da segunda amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

4.3.4. Análises dos parâmetros

As análises dos parâmetros foram realizadas no dia posterior ao da coleta de água do SAMAE, visando minimizar a degradação das amostras e possíveis interferências negativas nos resultados.

Para todos os tratamentos foram analisados os parâmetros cor aparente, turbidez, condutividade elétrica, temperatura e pH. Todas as análises seguiram em

conformidade com a metodologia do Standard Methods Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012) apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetro, equipamento e metodologia.

Parâmetro	**Equipamento/Modelo**	**Metodologia**
Cor aparente	Espectrofotômetro HACH 5000	2120 C
Turbidez	Turbidímetro Policontrol	2030 B
Condutividade elétrica	CondutivímetroMca 150	2510 B
pH	pHmetro mPA-210	4500 H+B
Temperatura	Termômetro digital	NA(1)

Fonte: Standard Methods of Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012).
Nota (1): NA = Não aplicável.

Há a ciência de que as exigências estabelecidas pela Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde são referentes ao tratamento completo da água. Entretanto, mesmo que este trabalho aborde apenas a etapa de eletrocoagulação, todos os parâmetros apresentados na Tabela 6 foram comparados com a Portaria nº 2914/11 para fins didáticos.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os ensaios aplicados e o planejamento dos parâmetros analisados, respectivamente, para a primeira e segunda amostragens.

Os tempos das análises da segunda amostragem, apresentadas na Tabela 8 são referentes à soma dos tempos de coleta de 20, 40, 60 e 80 minutos com as 24 horas propostas como tempo de sedimentação, os quais receberão a notação de 1460, 1480, 1500 e 1520 minutos.

Tabela 7 - Primeira amostragem: planejamento dos parâmetros.

Ensaio		**Concentração de sal ($mg.L^{-1}$)**	**Tempo (min)**	**Cor aparente ($mgPtCo.L^{-1}$)**		**Turbidez (NTU)**		**Condutividade elétrica ($\mu S.cm^{-1}$)**		**pH**		**Temperatura (ºC)**	
NaCl	**KCl**			**NaCl**	**KCl**	**NaCl**	**KCl**	**NaCl**	**KCl**	**NaCl**	**KCl**	**NaCl**	**KCl**
EC A1	EC A1	0 $mg.L^{-1}$	20										
			40										
			60										
			80										
NaCl A1 1	KCl A1 1	1 $mg.L^{-1}$	20										
			40										
			60										
			80										
NaCl A1 2	KCl A1 2	2 $mg.L^{-1}$	20										
			40										
			60										
			80										
NaCl A1 3	KCl A1 3	3 $mg.L^{-1}$	20										
			40										
			60										
			80										
NaCl A1 4	KCl A1 4	4 $mg.L^{-1}$	20										
			40										
			60										
			80										
NaCl A1 5	KCl A1 5	5 $mg.L^{-1}$	20										
			40										
			60										
			80										

Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 8 - Segunda amostragem: planejamento dos parâmetros.

Ensaio		Concentração de sal ($mg.L^{-1}$)	Tempo (min)	Cor aparente ($mgPtCo.L^{-1}$)		Turbidez (NTU)		Condutividade elétrica ($\mu S.cm^{-1}$)		pH		Temperatura (ºC)	
NaCl	**KCl**			**NaCl**	**KCl**	**NaCl**	**KCl**	**NaCl**	**KCl**	**NaCl**	**KCl**	**NaCl**	**KCl**
EC A2	EC A2	0 $mg.L^{-1}$	1460										
			1480										
			1500										
			1520										
NaCl A2 1	KCl A2 1	1 $mg.L^{-1}$	1460										
			1480										
			1500										
			1520										
NaCl A2 2	KCl A2 2	2 $mg.L^{-1}$	1460										
			1480										
			1500										
			1520										
NaCl A2 3	KCl A2 3	3 $mg.L^{-1}$	1460										
			1480										
			1500										
			1520										
NaCl A2 4	KCl A2 4	4 $mg.L^{-1}$	1460										
			1480										
			1500										
			1520										
NaCl A2 5	KCl A2 5	5 $mg.L^{-1}$	1460										
			1480										
			1500										
			1520										

Fonte: Autoria própria (2017).

4.3.5. Cálculo da eficiência de remoção de cor aparente e turbidez

Sobre os parâmetros cor aparente e turbidez, foram analisados não somente os resultados das medições feitas, mas também os percentuais de eficiência de remoção, os quais foram obtidos por meio de equações considerando os valores obtidos experimentalmente.

Para o cálculo da eficiência de remoção de cor aparente e turbidez, utilizou-se a Equação 10.

$$E_{remo\ção} = \left(\frac{Ci - Cf}{Ci}\right) * 100 \quad (10)$$

Onde:

$E_{remoção}$ é a eficiência de remoção de cor aparente ou turbidez (%);

C_i é o valor inicial de cor aparente ou turbidez, referente à amostra bruta ($mgPtCo.L^{-1}$);

C_f é o valor final de cor aparente ou turbidez, referente ao ensaio do tratamento ($mgPtCo.L^{-1}$).

4.3.6. Cálculo do desgaste do eletrodo

Para o cálculo do desgaste do eletrodo, foram utilizados dois métodos. O primeiro método calcula, por meio da Equação 11, a relação entre a massa consumida dos eletrodos com a quantidade de eletricidade que passa pela solução eletrolítica, em conformidade com Mollah et al. (2004). Esta equação é derivada da Lei de Faraday.

$$m_e = \frac{\mathrm{i.t.M}}{\mathrm{n.F}} \quad (11)$$

Onde:

m_e é a quantidade de massa do eletrodo dissolvido (g);

i é a corrente (A);

t é o tempo de processo (s);

M é a massa molar do elemento predominante do eletrodo (g.mol^{-1});

n é o número de elétrons da reação de oxidação do eletrodo anódico; e

F é a constante de Faraday (F = 9,65 x 10^{4} C.mol^{-1}).

O segundo método consiste em verificar a diferença da massa do eletrodo antes e depois do tratamento de eletrocoagulação, por meio de pesagem em balança analítica. O cálculo da diferença é apresentado na Equação 12.

$$m_e = mi - mf \tag{12}$$

Onde:

m_e é a quantidade de massa do eletrodo dissolvido (g);

mf é a quantidade de massa final do eletrodo (g);

mi é a quantidade de massa inicial do eletrodo (g).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Parâmetros da amostra bruta de água

Esta seção apresenta e analisa os resultados das amostras brutas de água para a primeira e segunda amostragens do SAMAE. Os valores dos parâmetros estão demonstrados nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Valores dos parâmetros da amostra bruta de água para a primeira amostragem.

Parâmetro	Valor
Cor aparente (mgPtCo.L^{-1})	128,0
Turbidez (NTU)	47,1
Condutividade elétrica (µS.cm^{-1})	99,9
Temperatura (ºC)	27
pH	8,10

Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 10 - Valores dos parâmetros da amostra bruta de água para a segunda amostragem.

Parâmetro	Valor
Cor aparente (mgPtCo.L^{-1})	91,0
Turbidez (NTU)	33,4
Condutividade elétrica (µS.cm^{-1})	160,0
Temperatura (ºC)	28
pH	6,12

Fonte: Autoria própria (2017).

As duas amostragens foram realizadas em conformidade com a metodologia descrita anteriormente, na Seção 4.7 - Análise dos parâmetros. Os resultados são apresentados em: Cor aparente (5.2); Turbidez (5.3); Condutividade elétrica (5.4); Temperatura (5.5); pH (5.6); e Desgaste dos eletrodos (5.7).

De acordo com os dados das Tabelas 9 e 10, é possível notar algumas diferenças: os parâmetros cor aparente e turbidez apresentaram valores maiores na primeira amostragem, pois a coleta de água foi realizada em um período marcado por intensas chuvas. A segunda amostra apresentou valores também altos de cor aparente e turbidez, pois o dia da coleta também pertenceu a um período de precipitações, porém menos intensas.

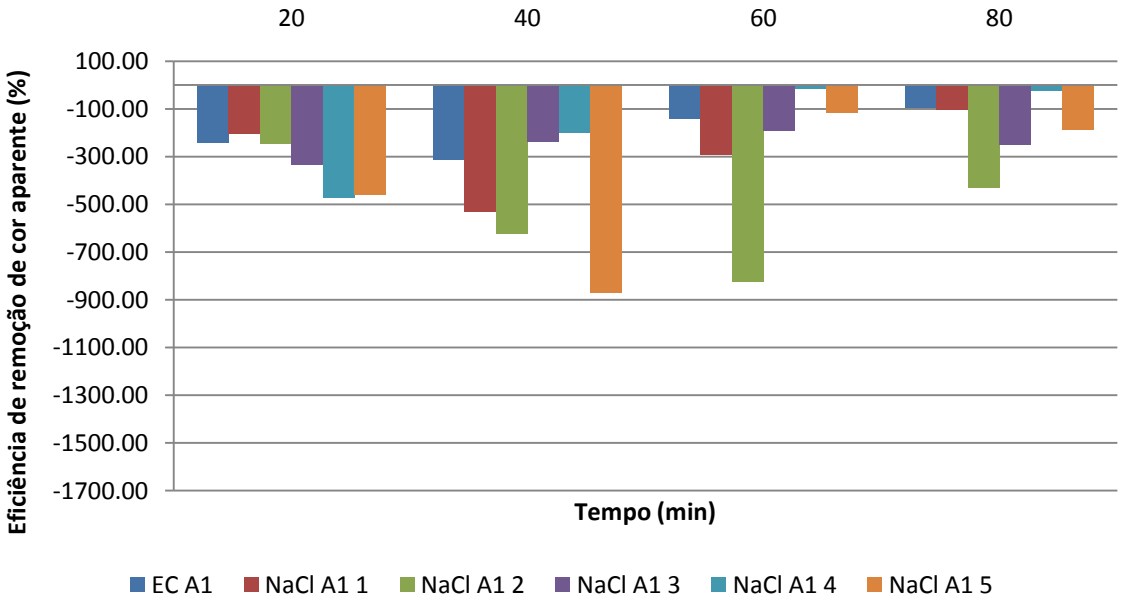
5.2 Cor Aparente

Esta seção apresenta e analisa os resultados referentes ao parâmetro cor aparente para as duas amostragens. Os resultados de todas as amostras coletadas encontram-se disponíveis nos Apêndices A.1, A.2, A.3, A.4, B.1, B.2, B.3 e B.4.

5.2.1. Cor aparente para a EC associada ao NaCl

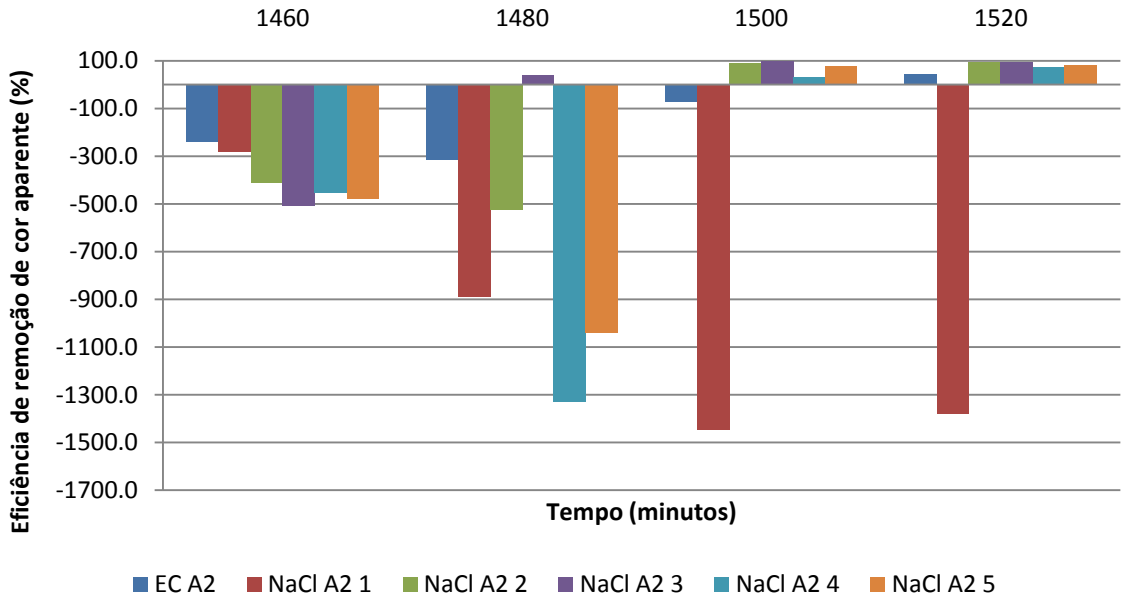
As Figuras 9 e 10 comparam a eficiência de remoção de cor aparente entre os tratamentos da EC e EC associada ao NaCl para a primeira e segunda amostragens de água, respectivamente.

Figura 9 - Eficiência de remoção de cor aparente ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a primeira amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 10 - Eficiência de remoção de cor aparente ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a segunda amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Sobre a primeira amostragem, o melhor resultado para a cor aparente, de 145,0 mgPtCo.L^{-1}, foi medido no ensaio NaCl A1 4 aos 60 minutos. Ao comparar este valor com o ensaio EC A1, também aos 60 minutos de tratamento, percebe-se o valor muito superior de 307,0 mgPtCo.L^{-1}.

Com base na Figura 9 e nos dados do Apêndice A.3, observa-se que todos os ensaios, independente do tratamento aplicado, apresentaram uma eficiência de remoção negativa do parâmetro cor aparente, ou seja, valores maiores quando comparados aos da amostra bruta.

Aos 80 minutos de tratamento, os ensaios apresentaram os melhores percentuais de eficiência, embora ainda negativos, chegando a -13% para o ensaio NaCl A1 4. Por outro lado, aos 40 minutos, foram obtidos os piores valores de eficiência, ultrapassando os -800%. Como dito anteriormente, estes resultados dizem respeito à presença dos $Fe(OH)_3$, os quais conferiram coloração castanho-avermelhada à solução.

Entretanto, com relação à segunda amostragem, com base na Figura 10, é possível observar, também aos 80 minutos, salvo em uma exceção, que o tratamento associado do NaCl apresentou eficiência de remoção positiva deste parâmetro, ou seja, o tempo de sedimentação de 24 horas contribuiu para a melhoria dos resultados.

A partir dos dados do Apêndices B.1, é possível dizer, em termos gerais, que todos os ensaios apresentaram valores exorbitantes de cor aparente nos primeiros 40 minutos. Entretanto, estes valores decresceram bruscamente com o decorrer do tempo, sendo os melhores resultados após os 80 minutos: 4,0 mgPt.Co.L^{-1} e 7,0 mgPt.Co.L^{-1}, referentes aos ensaios NaCl A2 2 e NaCl A2 3, respectivamente, se enquadrando ao VMP de 15 mgPt.Co.L^{-1} exigido pela Portaria nº 2914/11.

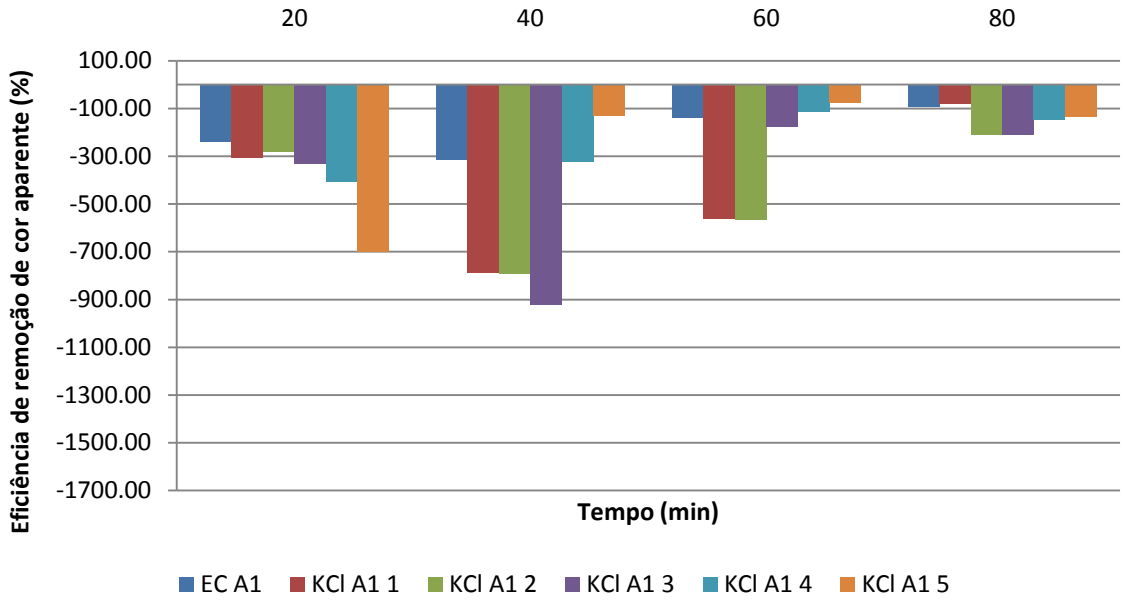
Em particular, obteve-se o valor de 0 mgPt.Co.L^{-1} para o ensaio NaCl A2 3 aos 60 minutos. Este ocorrido pode ser justificado pela eficiência de remoção de 100% do parâmetro, ou seja, o espectrofotômetro apresentou a leitura equivalente ao teste branco de calibração.

A partir dos valores apresentados no Apêndice B.3, é possível constatar ótimos resultados para a segunda amostragem: os ensaios NaCl A2 2 e NaCl A2 3 apresentaram, respectivamente, 95,6% e 92,3% de eficiência de remoção de cor aparente, valores estes muito superiores quando comparados aos 46,2% obtidos no ensaio EC A2. Desta forma, pode-se dizer que a associação do NaCl à EC foi positiva e satisfatória, já que houve grande aumento na remoção deste parâmetro e cumpriu às exigências estabelecidas pela Portaria nº 2914/11.

5.2.2. Cor aparente para a EC associada ao KCl

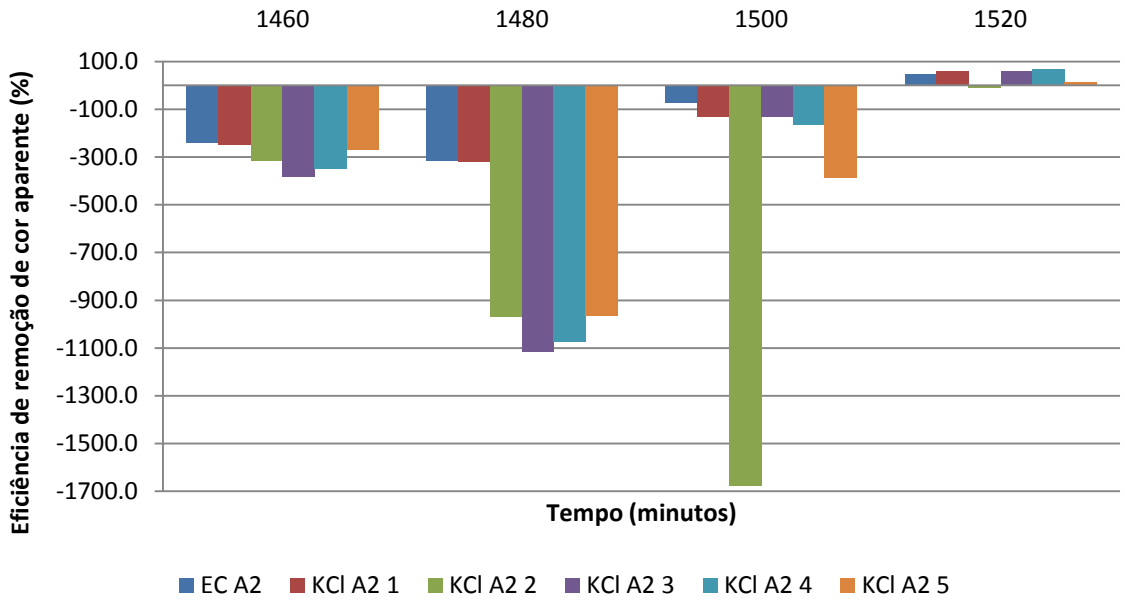
As Figuras 11 e 12 comparam a eficiência de remoção de cor aparente entre os tratamentos da EC e EC associada ao KCl para a primeira e segunda amostragens de água, respectivamente.

Figura 11 - Eficiência de remoção de cor aparente ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a primeira amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 12 - Eficiência de remoção de cor aparente ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a segunda amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Sobre a primeira amostragem, de acordo com os Apêndices A.1 e A.2, é possível observar valores exorbitantes deste parâmetro, alcançando até mesmo 1313,0 $mgPtCo.L^{-1}$, referente ao ensaio KCl A1 3 aos 40 minutos de tratamento. Comparando o menor valor obtido dentre todos os ensaios, de 225,0 $mgPtCo.L^{-1}$,

referente ao ensaio KCl A1 5 aos 60 minutos, com a Portaria nº 2914/11 do Ministério da Saúde (2011), percebe-se que esse ainda se encontra muito longe dos 15 mgPtCo.L^{-1} propostos como VMP pela Portaria nº 2914/11.

Considerando o Apêndice A.2, referente à primeira amostragem, os melhores resultados também foram obtidos em tempos maiores de tratamento, ultrapassando os 60 minutos, sendo o melhor valor de cor aparente igual a 225,0 mgPtCo.L^{-1}, obtido no ensaio KCl A1 5 aos 60 minutos de tratamento.

Sobre a segunda amostragem, os três tratamentos aplicados apresentam comportamento parecidos: eficiência negativa nos primeiros 40 minutos, sendo os piores percentuais medidos no tempo de 40 minutos, uma melhora brusca após 60 minutos e a eficiência positiva aos 80 minutos. Observou-se também, em alguns casos, percentuais extremamente negativos de eficiência, chegando a ultrapassar os -1600% no caso do ensaio KCl A2 2.

Ainda sobre a segunda amostragem, de acordo com os valores apresentados no Apêndice B.2, embora este tratamento tenha apresentado um bom desempenho, seus resultados finais não são satisfatórios: a melhor eficiência de remoção de 69,2% (28,0 mgPt.Co.L^{-1}), referente ao ensaio KCl A2 4, mesmo sendo superior aos 46,2% do ensaio EC A2, esse percentual ainda está muito abaixo quando comparado aos resultados da EC associada ao NaCl. Ainda, mesmo com uma eficiência de 69,2% de remoção, o valor final de 28,0 mgPt.Co.L^{-1}, como dito anteriormente, é superior ao VMP da Portaria nº 2914/11.

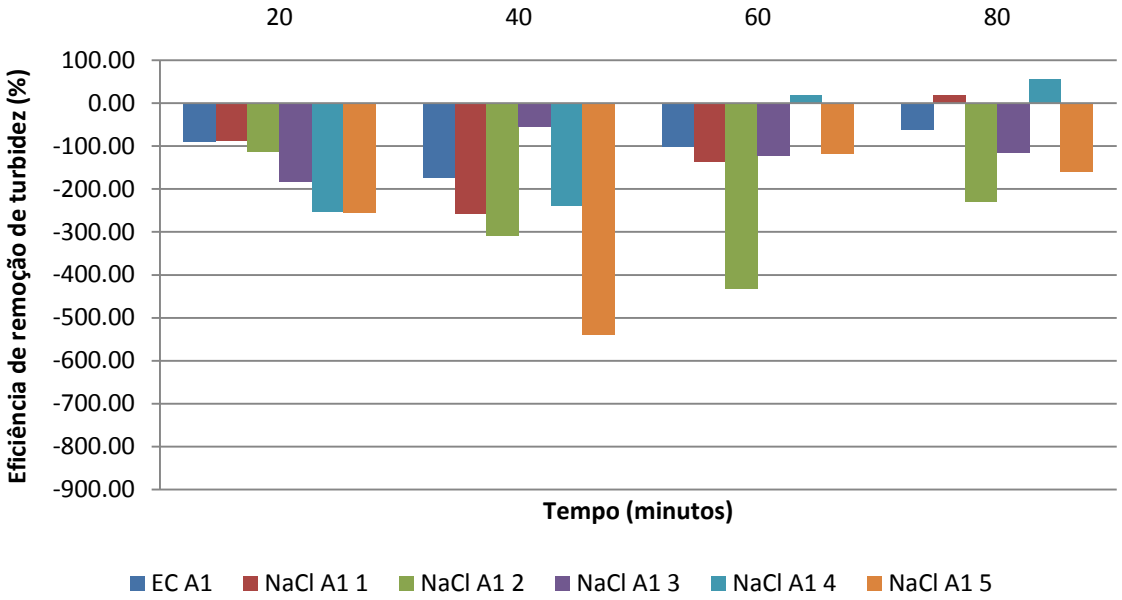
5.3 Turbidez

Esta seção apresenta e analisa os resultados referentes ao parâmetro turbidez para as duas amostragens. Os resultados de todas as amostras coletadas encontram-se disponíveis nos Apêndices A.1, A.2, A.3, A.4, B.1, B.2, B.3 e B.4.

5.3.1. Turbidez para a EC associada ao NaCl

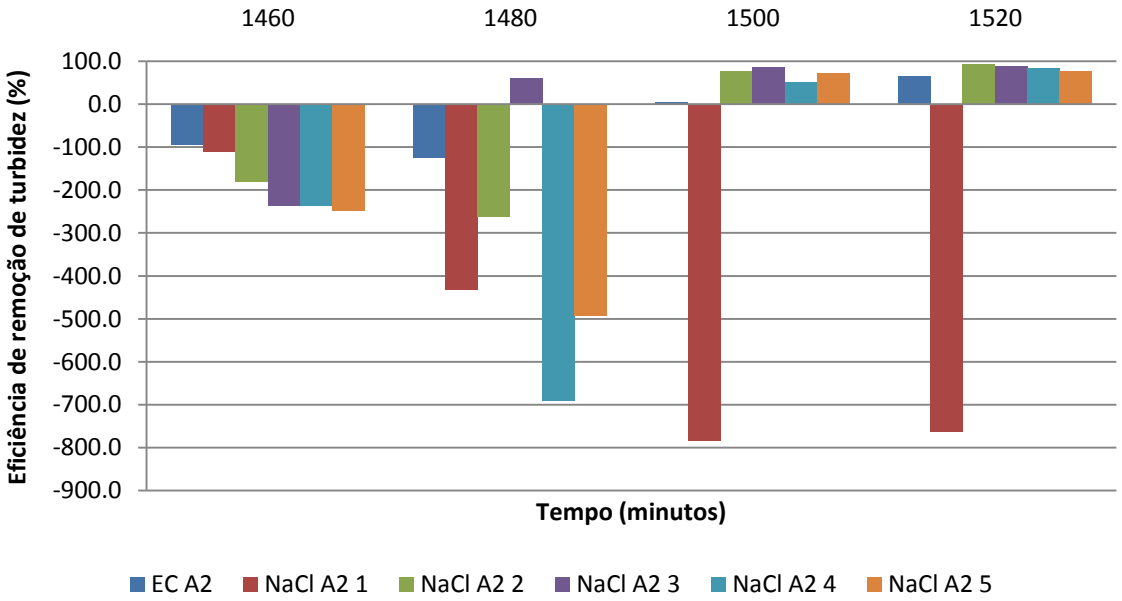
As Figuras 13 e 14 comparam a eficiência de remoção de turbidez entre os tratamentos da EC e EC associada ao NaCl para a primeira e segunda amostragens de água, respectivamente.

Figura 13 - Eficiência de remoção de turbidez ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a primeira amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 14 - Eficiência de remoção de turbidez ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a segunda amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Com relação à primeira amostragem, é possível observar, a partir dos dados apresentados nos Apêndices A.1 e A.2, que os menores valores da turbidez foram alcançados devido à presença dos sais em solução, tanto para o NaCl quanto para o

KCl, agregando de forma positiva à EC. O ensaio NaCl A1 4 apresentou o melhor resultado dentre todos: alcançou 21,2 NTU em 80 minutos (54,99% de eficiência), enquanto que o ensaio EC A1, ou seja, sem a presença do sal, apresentou 76,1 NTU (-61,57% de eficiência) neste mesmo tempo medido.

De acordo com os Apêndices A.1 e A.2, o maior valor para turbidez, de 301,0 NTU, foi medido no ensaio NaCl A1 5 aos 40 minutos de tratamento. Ainda, é possível observar que os maiores valores da turbidez ocorreram entre os 40 e 60 minutos de tratamento, ou seja, momento em que as reações da EC estavam mais intensas, liberando uma quantidade maior de $Fe(OH)_3$ *in situ*.

Com base na Figura 13, em termos gerais, os ensaios apresentaram uma eficiência de remoção negativa para o parâmetro turbidez. De forma pontual, ocorreram eficiências positivas de remoção , sendo o melhor valor ocorreu no ensaio NaCl A1 4: 54,99% de eficiência após 80 minutos de tratamento.

Em contrapartida, alguns ensaios apresentaram valores extremamente negativos de eficiência de remoção de turbidez nos primeiros 40 minutos de tratamento, chegando a ultrapassar -500%. Estes resultados possuem a mesma justificativa da cor aparente, ou seja, no que diz respeito à eficiência da EC, não devem ser consideradas as medições realizadas por conta da quantidade elevada dos hidróxidos de ferro III suspensos.

Sobre a segunda amostragem, a partir do Apêndice B.3, foi observado que, dentre todos os resultados, o melhor foi obtido no ensaio NaCl A2 2 aos 80 minutos de tratamento, com uma eficiência de remoção de turbidez igual a 91,4%, percentual este muito superior quando comparado aos 65,6% do tratamento da EC A2.

Os tratamentos associados aos sais apresentaram comportamentos parecidos nos primeiros 40 minutos e em 80 minutos. Já com relação às medições feitas em 60 minutos, foram constatados comportamentos distintos: no caso da EC associada ao NaCl, desconsiderando o ensaio NaCl A2 1, todos os ensaios apresentaram percentuais positivos de eficiência de remoção, sendo 50,3% o menor valor e 85,1% o maior valor.

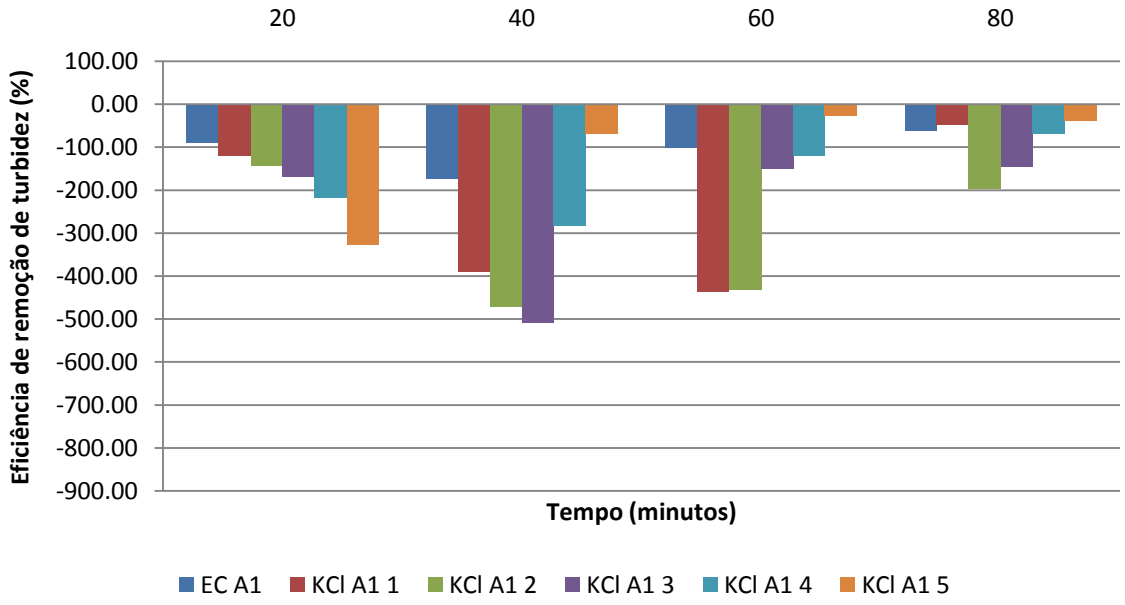
A associação do NaCl à EC proporcionou resultados positivos e satisfatórios, pois o sal melhorou o desempenho do processo: enquanto que o ensaio EC A2 apresentou como melhor resultado 11,5 NTU, os ensaios NaCl A2 2 e NaCl A2 3 apresentaram, respectivamente, os valores de 2,9 e 4,2 NTU, os quais estão em conformidade com o VMP de 5 NTU estabelecido pela Portaria nº 2914/11.

Comparando estes resultados com os da primeira amostragem, é possível notar a grande diferença do parâmetro turbidez: como já relatado anteriormente, o melhor resultado da primeira amostragem foi de 21,1 NTU, referente ao ensaio NaCl A1 4. Ainda, também sobre a primeira amostragem, o ensaio EC A1 apresentou o melhor valor de 76,1 NTU, aos 80 minutos.

5.3.2. Turbidez para a EC associada ao KCl

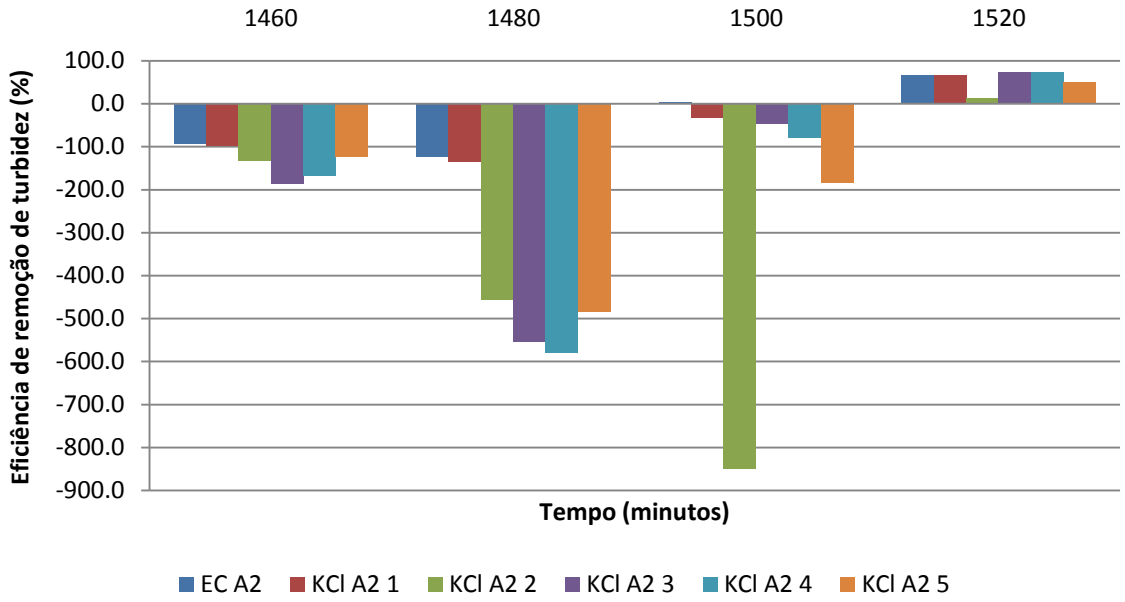
As Figuras 15 e 16 comparam a eficiência de remoção de turbidez entre os tratamentos da EC e EC associada ao KCl para a primeira e segunda amostragens de água, respectivamente.

Figura 15 - Eficiência de remoção de turbidez ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a primeira amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 16 - Eficiência de remoção de turbidez ao longo do tempo dos tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a segunda amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Com relação ao tratamento associado ao KCl da primeira amostragem, os melhores resultados para turbidez ocorreram em situações de maior concentração salina e em tempos maiores de tratamento, sendo 60,2 NTU o melhor valor alcançado, obtido no ensaio KCl A1 5 aos 60 minutos.

Comparando os resultados dos três tratamentos aplicados, pode-se dizer que, ao associar sais à EC, houve uma remoção mais intensa da turbidez devido ao incremento na condutividade elétrica da solução. Esta situação foi também constatada por Holt et al. (2002) que observaram uma melhora no desempenho da EC devido à resposta mais rápida de remoção da turbidez proporcionado pela adição do NaCl.

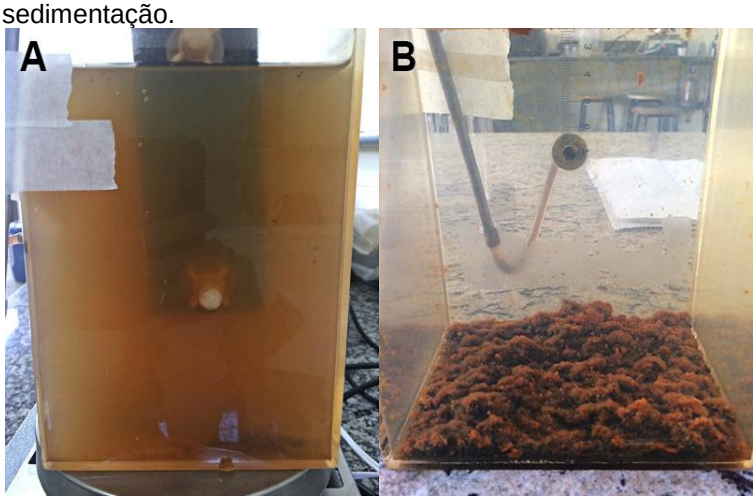
Ao comparar os valores da turbidez da amostra bruta com os resultados dos tratamentos, percebe-se que a adição de sais contribuiu para o desempenho da EC. Entretanto, o menor valor medido para a turbidez, de 21,2 NTU, ainda não se enquadra ao VMP de 5 NTU estabelecido pela Portaria nº 2914/11.

Com relação à segunda amostragem, é possível constatar na Figura 16 o comportamento similar ao do parâmetro cor aparente: eficiência negativa nos primeiros 40 minutos, sendo os piores percentuais em 40 minutos, uma melhoria significativa em 60 minutos e a eficiência positiva aos 80 minutos de tratamento, salvo em algumas poucas exceções.

Ainda sobre a segunda amostragem, todos os ensaios apresentaram percentuais negativos, variando desde -32,9% até -849,1%, porém, mesmo com os percentuais negativos em 60 minutos, todos os ensaios se tornaram positivos aos 80 minutos, atingindo o máximo de 72,8% para o ensaio KCl A2 4.

Embora a amostra bruta de água da segunda amostragem tenha apresentado valor de turbidez menor em relação à primeira amostragem, é possível perceber o quanto os $Fe(OH)_3$ em suspensão influenciaram negativamente as medições, ou seja, o tempo de 24 horas de sedimentação contribuiu de fato para a medição correta deste parâmetro, apresentando valores de turbidez dentro das exigências legislativas sobre a potabilidade da água. Este ocorrido está apresentado de forma comparativa na Figura 17.

Figura 17 - (a) Reator durante o tratamento da eletrocoagulação; (b) Reator depois de 24 horas de sedimentação.



Fonte: Autoria própria (2017).

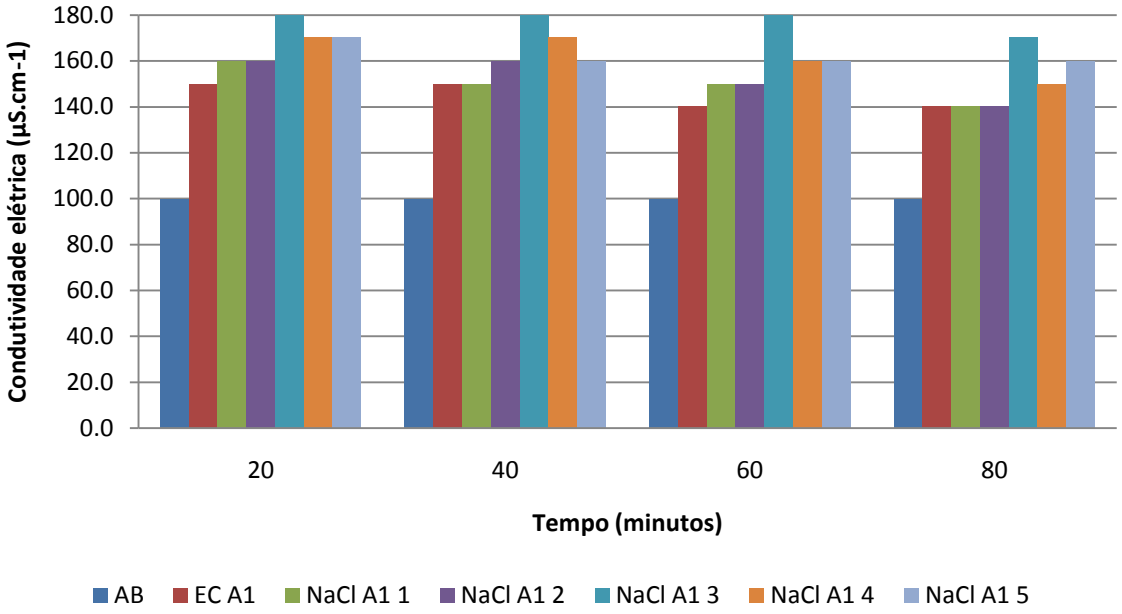
5.4 Condutividade elétrica

Esta seção apresenta e analisa os resultados referentes ao parâmetro condutividade elétrica para as duas amostragens. Os resultados de todas as amostras coletadas encontram-se disponíveis nos Apêndices A.1, A.2, B.1 e B.2.

5.4.1. Condutividade elétrica para a EC associada ao NaCl

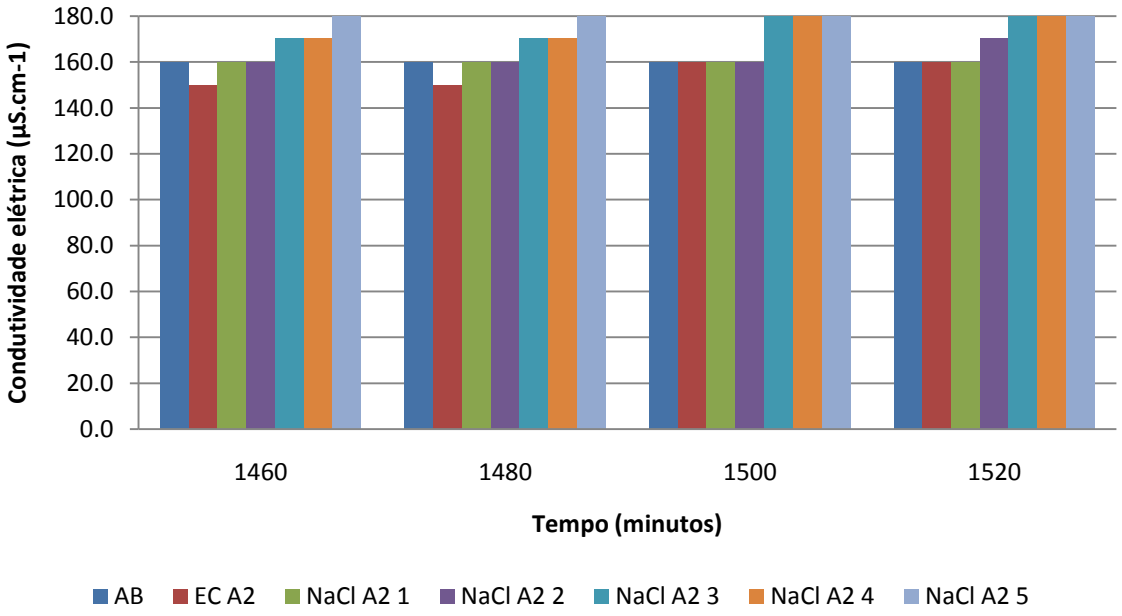
As Figuras 18 e 19 comparam os valores da condutividade elétrica entre a amostra bruta, os tratamentos da EC e EC associada ao NaCl para a primeira e segunda amostragens de água, respectivamente.

Figura 18 - Comportamento dos valores da condutividade elétrica ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a primeira amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 19 - Comportamento dos valores da condutividade elétrica ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a segunda amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

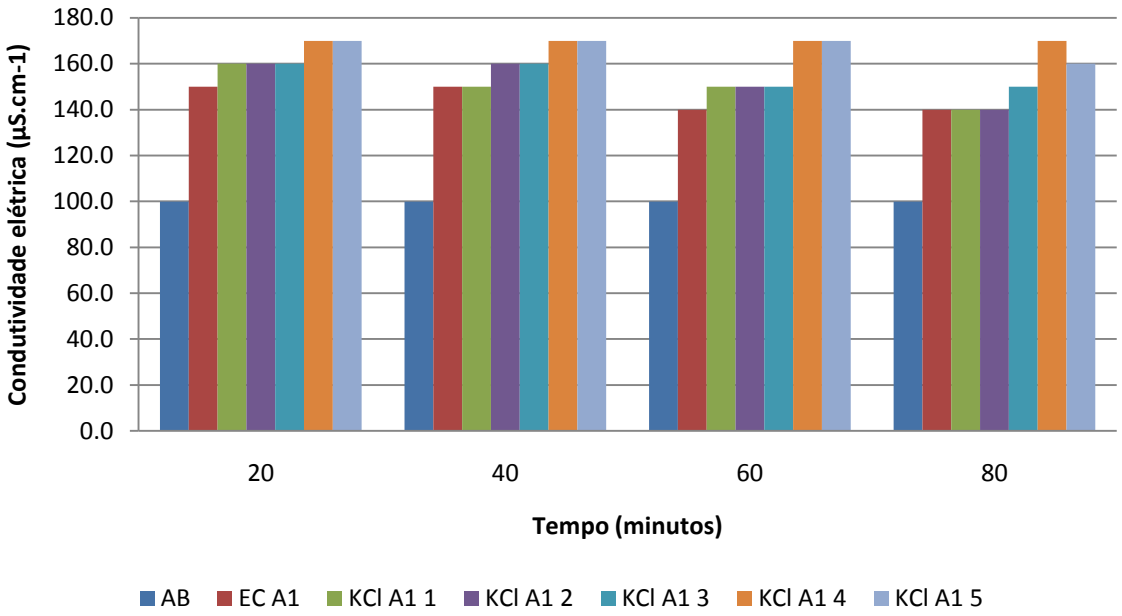
Ao observar a Figura 18, é possível notar que independente da concentração de NaCl aplicada o valor da condutividade elétrica aumentou. De acordo com a Tabela 9, referente aos parâmetros da amostra bruta da primeira amostragem, tem-se uma condutividade elétrica de 99,9 $\mu S.cm^{-1}$ e conforme os Apêndices A.1 e A.2, constata-se que o ensaio EC A1 apresentou, já em seus primeiros 20 minutos, um aumento considerável da condutividade elétrica, chegando aos 150 $\mu S.cm^{-1}$. Ainda, com base no Apêndice A.1, o ensaio NaCl A1 3 foi o que apresentou os maiores valores deste parâmetro, atingindo 180,0 $\mu S.cm^{-1}$ ao longo dos primeiros 60 minutos de tratamento.

Com relação à segunda amostragem, é possível observar na Figura 19 que todos os ensaios apresentaram uma constância nos valores de condutividade elétrica. Ainda, percebe-se que o tempo de sedimentação pouco influenciou na variação deste parâmetro. Ainda, alguns ensaios apresentaram os mesmos valores durante todos os 80 minutos do tratamento aplicado.

5.4.2. Condutividade elétrica para a EC associada ao KCl

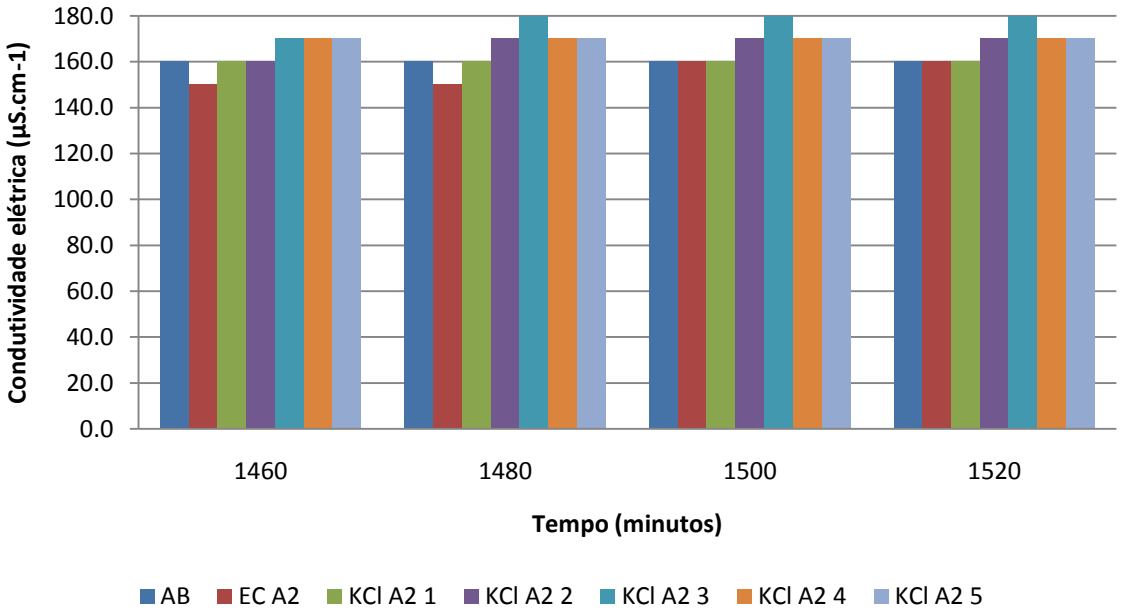
As Figuras 20 e 21 comparam os valores da condutividade elétrica entre a amostra bruta, os tratamentos da EC e EC associada ao KCl para a primeira e segunda amostragens de água, respectivamente.

Figura 20 - Comportamento dos valores da condutividade elétrica ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a primeira amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 21 - Comportamento dos valores da condutividade elétrica ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a segunda amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Sobre a primeira amostragem, de acordo com o Apêndice A.2, os ensaios KCl A1 4 e KCl A1 5 apresentaram os maiores valores de condutividade elétrica, atingindo 170,0 $\mu S.cm^{-1}$ em suas maiorias. Com base nestas informações, é possível dizer que houve aumento na condutividade elétrica por conta do tratamento

da EC, e que, quando associado aos sais NaCl e KCl, este parâmetro elevou-se ainda mais.

Nos Apêndices B.1 e B.2, é possível observar que o menor valor da condutividade elétrica, igual a 150,0 $\mu S.cm^{-1}$, ocorreu nos primeiros 40 minutos no ensaio EC A2, enquanto que, os valores máximos de 180,0 $\mu S.cm^{-1}$ foram obtidos nos tratamentos associados aos sais NaCl e KCl. Desta forma, pode-se dizer que a associação com os sais contribuiu para o aumento da condutividade elétrica da solução. Ainda, diferente da primeira amostragem, a EC na segunda amostragem não produziu aumento no parâmetro, mantendo valores próximos aos 160,0 $\mu S.cm^{-1}$.

Com isto, em conformidade com os estudos de Daneshvar et al. (2006), que apontam a relação da condutividade elétrica com a eficiência da EC, é possível dizer que a associação dos sais aumentou a condutividade elétrica da solução, a qual, por sua vez, provocou a melhora no desempenho da EC em relação à eficiência de remoção da cor aparente e turbidez. Esta constatação pode ser comprovada com os resultados já comentados anteriormente, pois os melhores valores da cor aparente e turbidez foram obtidos nos tratamentos associados aos sais.

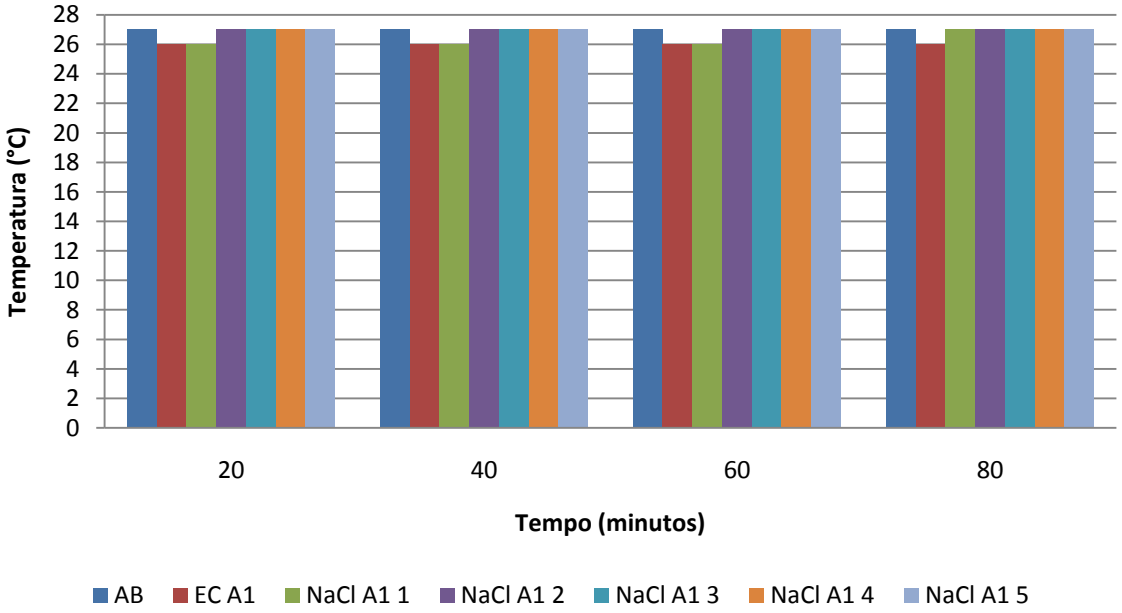
5.5 Temperatura

Esta seção apresenta e analisa os resultados referentes ao parâmetro temperatura para as duas amostragens. Os resultados de todas as amostras coletadas encontram-se disponíveis nos Apêndices A.1, A.2, B.1 e B.2.

5.5.1. Temperatura para a EC associada ao NaCl

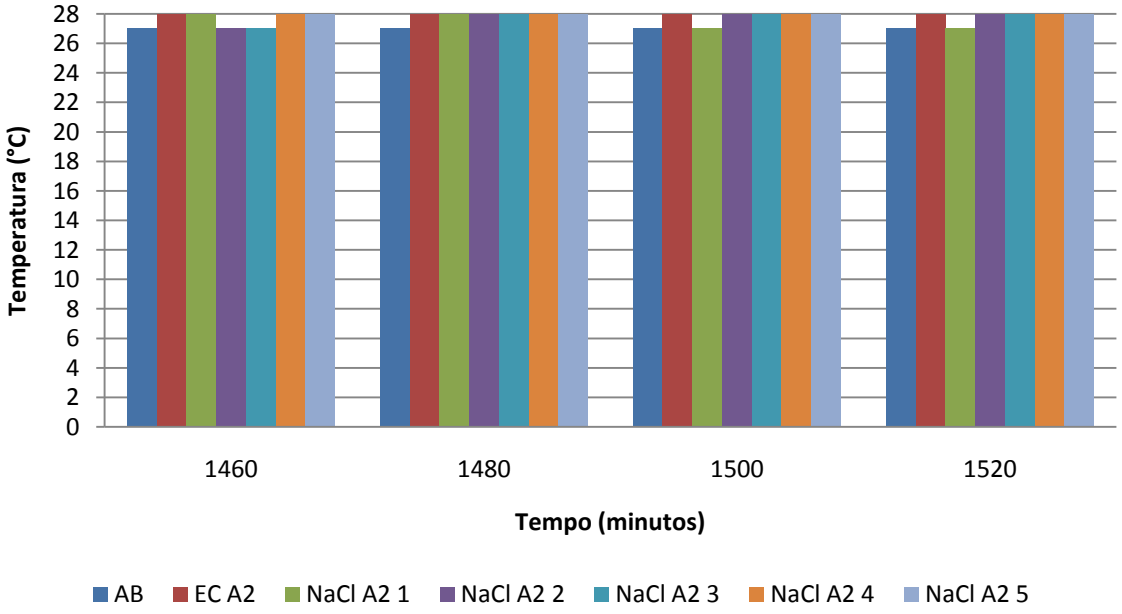
As Figuras 22 e 23 comparam os valores da temperatura entre a amostra bruta, os tratamentos da EC e EC associada ao NaCl para a primeira e segunda amostragens de água, respectivamente.

Figura 22 - Comportamento dos valores da temperatura ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a primeira amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 23 - Comportamento dos valores da temperatura ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a segunda amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Sobre a primeira amostragem, com base na Figura 22, observa-se que a temperatura se manteve dentro do intervalo de 24 ºC a 27 ºC, em outras palavras, houve pouca alteração, tanto em relação ao tempo de tratamento, quanto em

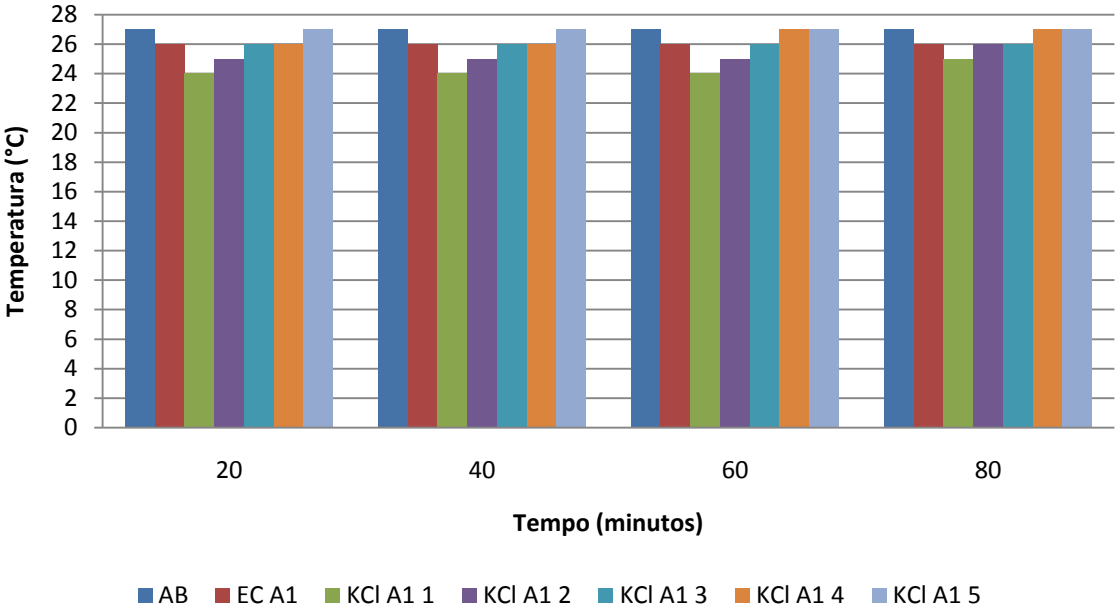
relação à concentração salina aplicada, logo, a presença do NaCl exerceu pouca influência sobre o comportamento deste parâmetro.

A segunda amostragem (Figura 23) também apresentou uma temperatura mantida praticamente constante, tanto em relação ao tempo quanto à concentração do NaCl, pertencendo ao intervalo de 27 ºC a 28 ºC. Ainda, constata-se a pouca influência dos sais sobre o comportamento da temperatura.

5.5.2. Temperatura para a EC associada ao KCl

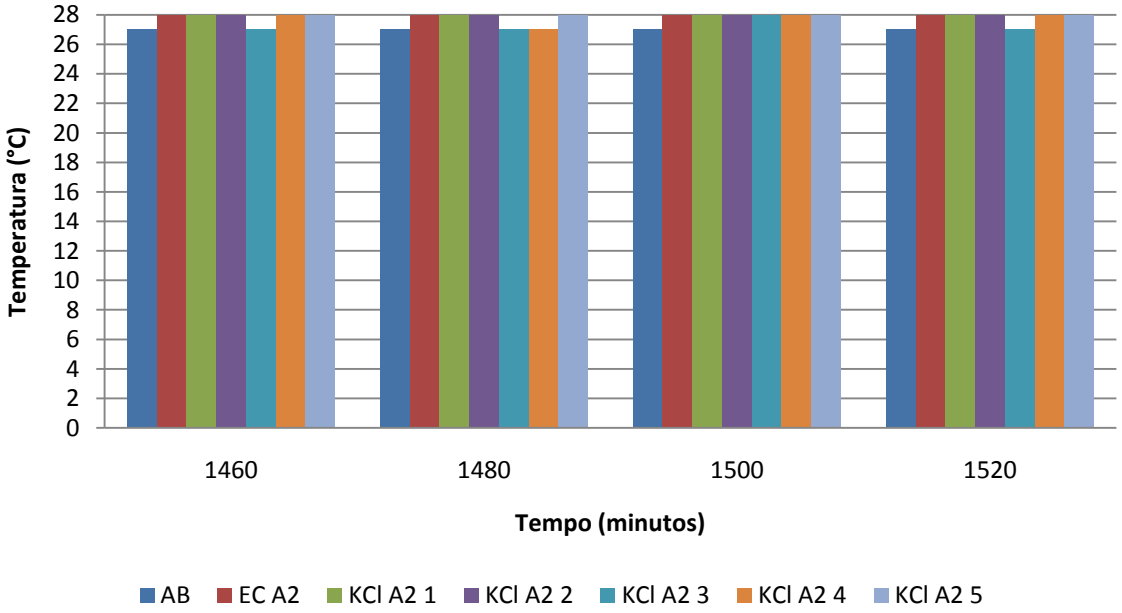
As Figuras 24 e 25 comparam os valores da temperatura entre a amostra bruta, os tratamentos da EC e EC associada ao KCl para a primeira e segunda amostragens de água, respectivamente.

Figura 24 - Comportamento dos valores da temperatura ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a primeira amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 25 - Comportamento dos valores da temperatura ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a segunda amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Para a primeira amostragem, de forma similar ao caso do NaCl, é possível notar na Figura 24 que a temperatura pouco variou, em outras palavras, a variação da concentração do KCl não influenciou sobre o comportamento deste parâmetro.

Ainda sobre a primeira amostragem, os menores valores da temperatura foram observados no ensaio KCl A1 1, com uma constância de 24 ºC nos primeiros 60 minutos e 25 ºC ao final. A falta de grandes alterações da temperatura é justificada pela baixa corrente elétrica dos eletrodos e também pela constância da condutividade elétrica, a qual mesmo tendo se elevado um pouco em relação ao valor inicial da amostra, ainda permaneceu relativamente baixa. Caso contrário, se a corrente elétrica dos eletrodos fosse elevada, teria a possibilidade de aquecimento dos mesmos, levando ao aumento da temperatura da água.

Com base nestas informações, pode-se dizer que, embora a temperatura tenha apresentado menor variação, o seu comportamento é similar e não interferiu nos resultados dos outros parâmetros estudados.

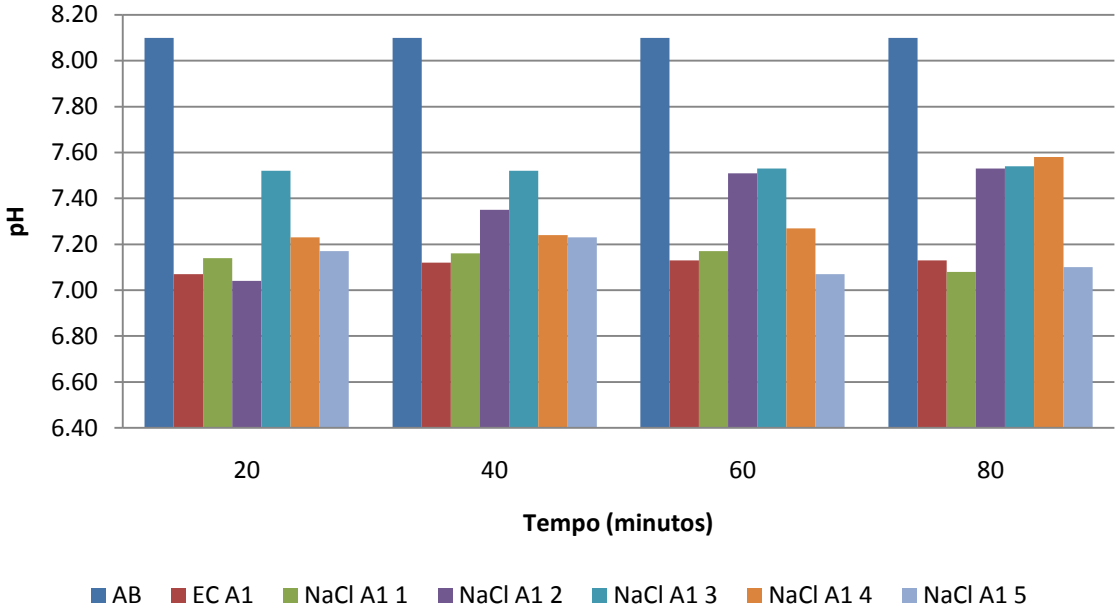
5.6 pH

Esta seção apresenta e analisa os resultados referentes ao parâmetro pH para as duas amostragens. Os resultados de todas as amostras coletadas encontram-se disponíveis nos Apêndices A.1, A.2, B.1 e B.2.

5.6.1. pH para a EC associada ao NaCl

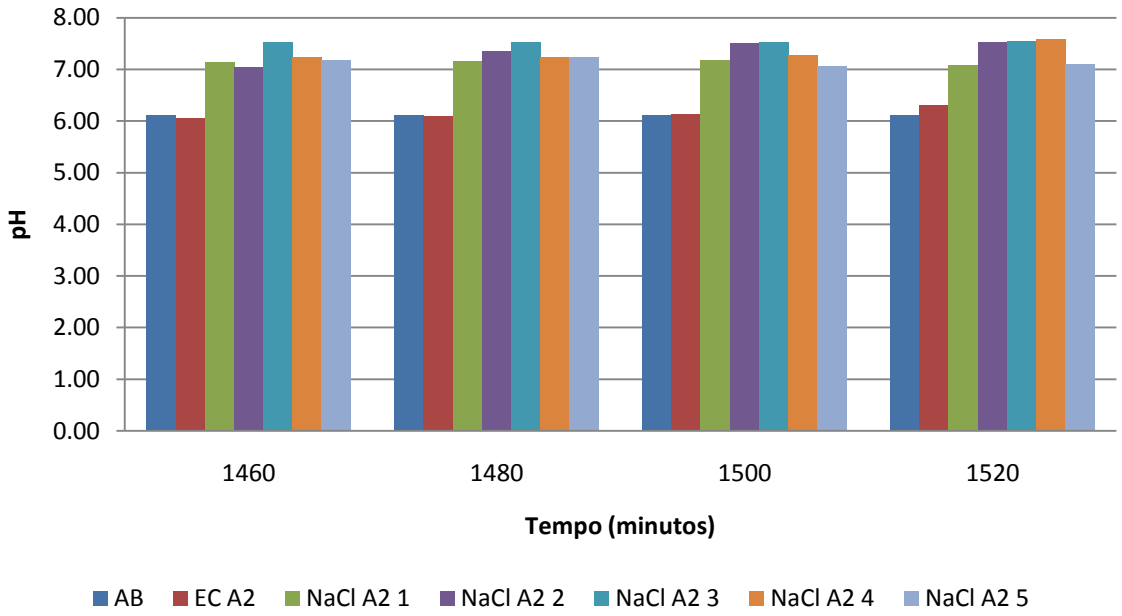
As Figuras 26 e 27 comparam os valores da temperatura entre a amostra bruta, os tratamentos da EC e EC associada ao NaCl para a primeira e segunda amostragens de água, respectivamente.

Figura 26 - Comportamento dos valores médios do pH ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a primeira amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 27 - Comportamento dos valores do pH ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao NaCl para a segunda amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Sobre a primeira amostragem, com base nos valores apresentados no Apêndice A.1 é possível observar que todos os ensaios apresentaram pH próximos ao valor 7,0 (neutro), sendo o ensaio NaCl A1 3 o responsável pela menor alteração de pH. Em conformidade com Daneshvar et al. (2006), o pH influencia o desempenho da EC quanto à eficiência de remoção do parâmetro cor aparente. Ainda, o autor afirma que a melhor eficiência ocorreu com o pH na faixa de 5,5 a 8,5, com uma máxima eficiência em pH igual a 7,0. Com base nestas constatações, pode-se dizer que, para esta amostragem, o pH esteve praticamente em seu melhor intervalo durante todos os ensaios dos tratamentos aplicados.

Com comportamento similar à primeira amostragem, a segunda apresentou, em todos os ensaios (Apêndice B.1), pH superiores ao neutro, sendo 7,04 o menor valor, pertencente ao ensaio NaCl A2 2.

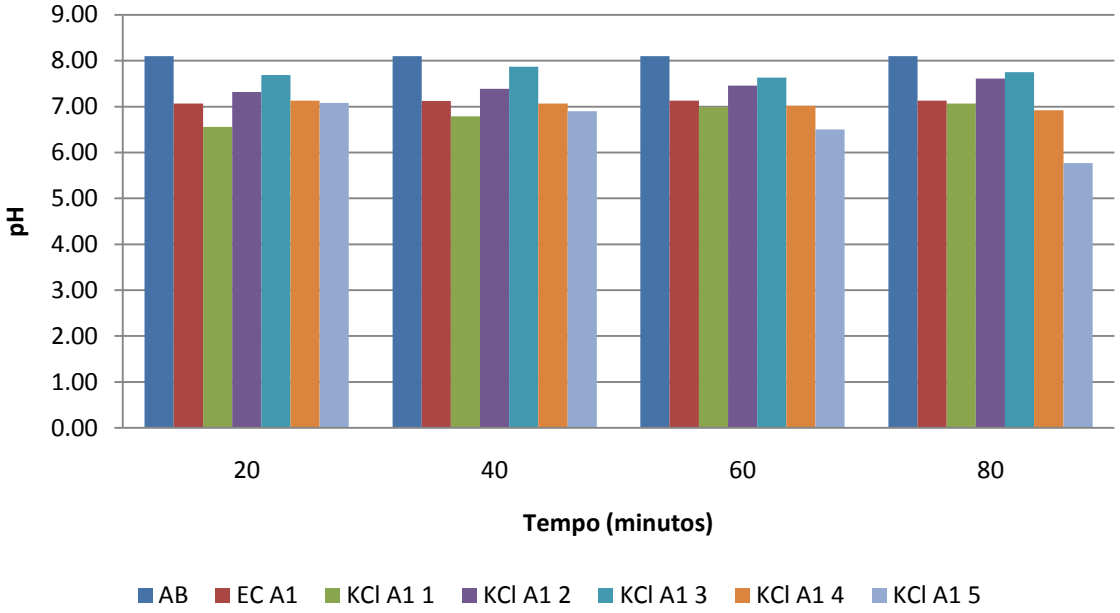
Em conformidade com os estudos de Chen (2004), os efeitos do pH afetam a eficiência da EC e a solubilidade dos hidróxidos metálicos, sendo que a melhor remoção de poluentes acontece em neutro. Com isto, é possível dizer que o pH esteve em seu melhor intervalo durante praticamente todos os ensaios dos tratamentos realizados também para esta segunda amostragem.

Ainda, é possível constatar que todos os tratamentos se enquadram às exigências estabelecidas pela Portaria nº 2914/11, a qual estabelece o intervalo de 6,0 a 9,5 como VMP para o parâmetro pH.

5.6.2. pH para a EC associada ao KCl

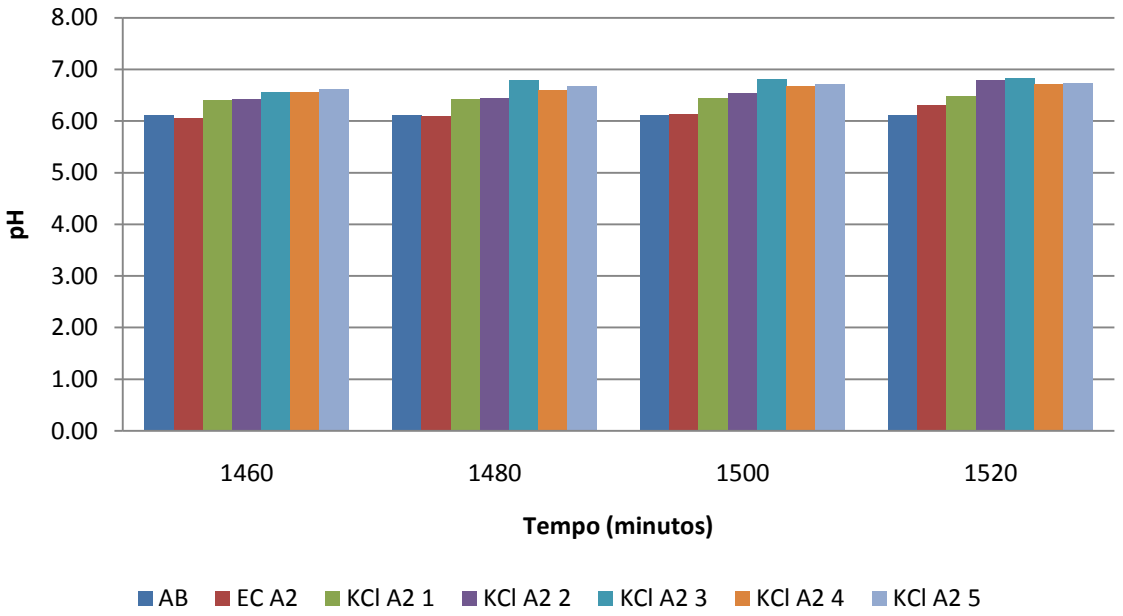
As Figuras 28 e 29 comparam os valores da temperatura entre a amostra bruta, os tratamentos da EC e EC associada ao NaCl para a primeira e segunda amostragens de água, respectivamente.

Figura 28 - Comportamento dos valores do pH ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a primeira amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Figura 29 - Comportamento dos valores do pH ao longo do tempo para os tratamentos da EC e da EC associada ao KCl para a segunda amostragem.



Fonte: Autoria própria (2017).

Para a primeira amostragem, considerando o tempo de 80 minutos, ao passo em que no ensaio KCl A1 3 o pH atingiu o pico de 7,75, no ensaio KCl A1 5, ele atingiu até 5,77. Ainda, a partir das Figuras 26 e 28, pode-se observar que, independentemente do tratamento exercido, o pH diminuiu com relação à amostra bruta inicial, cujo valor é de 8,10. De acordo com Mollah et al. (2001), esta redução do pH pode ser justificada pela hidratação dos íons Fe^{3+}, que resulta na formação de hidróxidos de ferro e liberação de íons H^{+}. Além disso, Chen (2004) comenta da evolução de oxigênio no cátodo, que também pode contribuir para a diminuição do pH.

Sobre a segunda amostragem, com base nas Figuras 27 e 29, com comportamento similar à primeira amostragem, foi observado que o pH não mostrou grandes alterações, mantendo certa constância com valores próximos ao 7,0 (neutro). Entretanto, o tipo do tratamento aplicado influenciou o parâmetro: a partir dos dados dos Apêndices B.1 e B.2, notou-se que o tratamento da EC A2 obteve o pH máximo de 6,31, enquanto que, os tratamentos com a associação do NaCl e do KCl apresentaram, respectivamente, os máximos de 7,58 e 6,83 deste mesmo parâmetro. Desta forma, pode-se dizer que os três tratamentos aplicados proporcionaram aumento no pH, já que a amostra bruta apresentou apenas 6,12, conforme descrito anteriormente na Tabela 10.

De acordo com o Apêndice B.2, embora alguns ensaios tenham apresentado valores próximos, nenhum superou o neutro, sendo o maior valor obtido igual a 6,83, referente ao ensaio KCl A2 3. A maior alteração deste parâmetro ocorreu no ensaio KCl A2 2: foram medidos 6,42 nos primeiros 20 minutos e 6,79 aos 80 minutos.

5.7 Desgaste dos eletrodos

Esta seção apresenta e analisa os resultados referentes ao parâmetro desgaste dos eletrodos para as duas amostragens. Os resultados de todas as amostras coletadas encontram-se disponíveis nos Apêndices A.5 e B.5.

As Tabelas 11 e 12 apresentam a relação dos tratamentos aplicados com os desgastes dos eletrodos para a primeira e segunda amostragens, respectivamente. Para fins comparativos, os desgastes dos eletrodos foram obtidos de duas maneiras: pesagem dos eletrodos após os tratamentos e cálculo pela Equação 10.

Sobre a variável *n* desta equação, referente ao número de elétrons da reação de oxidação do eletrodo anódico, foi utilizado o valor de 8 conforme apresentado anteriormente na Equação 2 do Mecanismo 1, porque depois da realização dos tratamentos, observou-se a formação de $Fe(OH)_3$ em solução, ou seja, reações incompletas dos processos de eletrocoagulação. Os valores obtidos de corrente elétrica para as duas amostragens estão disponíveis nos Apêndices A.5 e B.5.

Tabela 11 - Valores dos desgastes dos eletrodos após os tratamentos para a primeira amostragem.

Tratamento	**Desgaste dos eletrodos experimental (g)**	**Desgaste dos eletrodos teórico(g)**
EC A1	0,030	0,042
NaCl A1 1	1,130	0,031
NaCl A1 2	- 0,400	0,024
NaCl A1 3	- 0,020	0,028
NaCl A1 4	- 2,680	0,024
NaCl A1 5	- 1,220	0,024
KCl A1 1	0,050	0,024
KCl A1 2	- 0,850	0,021
KCl A1 3	- 0,320	0,021
KCl A1 4	- 1,660	0,024
KCl A1 5	- 0,500	0,028

Fonte: Autoria própria (2017).

Tabela 12 - Valores dos desgastes dos eletrodos após os tratamentos para a segunda amostragem.

Ensaio	Desgaste dos eletrodos experimental (g)	Desgaste dos eletrodos teórico (g)
EC A2	- 0,040	0,069
NaCl A2 1	0,060	0,056
NaCl A2 2	0,070	0,059
NaCl A2 3	0,090	0,063
NaCl A2 4	- 1,460	0,063
NaCl A2 5	- 0,220	0,056
KCl A2 1	0,380	0,052
KCl A2 2	0,370	0,052
KCl A2 3	- 0,770	0,056
KCl A2 4	- 0,590	0,056
KCl A2 5	0,250	0,052

Fonte: Autoria própria (2017).

Com base nos dados apresentados na Tabela 11, percebe-se a divergência entre os valores experimentais e teóricos. Ainda, em vários casos, é notado o aumento da massa dos eletrodos ao invés do desgaste, este ocorrido é justificado pelas limpezas realizadas antes dos ensaios.

Com resultados similares à primeira amostragem, a segunda amostragem (Tabela 12) também apresentou desacordos entre os valores experimentais e teóricos. Este ocorrido pode ser justificado pelo fato do reator EC ser em escala de bancada, pois se forem consideradas aplicações em maiores dimensões, com um volume maior de água, os desgastes dos eletrodos seriam mais expressivos.

6 CONCLUSÃO

Com relação aos objetivos propostos neste trabalho e aos resultados obtidos nas duas amostragens, é possível concluir que a associação da EC com os sais NaCl e KCl foi eficiente para o tratamento da água na segunda amostragem, logo, o tempo de sedimentação de 24 horas foi essencial para a obtenção de melhores resultados.

Sobre a remoção dos parâmetros cor aparente e turbidez, tanto para o tratamento da EC associada ao NaCl quanto da EC associada ao KCl podem ser avaliados como positivos e satisfatórios, sendo o ensaio NaCl A2 2 (segunda amostragem) o responsável pelo melhor resultado dentre todos.

Sobre o acompanhamento dos parâmetros temperatura e pH, conclui-se que eles pouco alteraram ao longo dos ensaios, ou seja, houve certa constância para ambos. Já para a condutividade elétrica, a associação da EC aos sais provocou o aumento deste parâmetro, contribuindo para o desempenho da EC na remoção da cor aparente e turbidez.

No que diz respeito ao desgaste dos eletrodos, é possível concluir que a limpeza dos eletrodos influenciou a medição da massa dos mesmos, causando certa divergência em relação aos valores calculados.

Em termos gerais, pode-se concluir que a associação da EC com os sais NaCl e KCl se mostrou mais eficiente do que o tratamento não associado, logo, uma alternativa sustentável para o tratamento de água.

Por fim, considerando os resultados apresentados neste estudo, recomenda-se, para a continuidade deste projeto, investigar não somente a eletrocoagulação como uma etapa isolada, mas sim acompanhada da filtração. Ainda, por ser extremamente versátil, torna-se possível investigar diferentes reatores de EC, variando o metal utilizado, arranjos, dimensões, dentre outros.

REFERÊNCIAS

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

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - Conama. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União**. Poder executivo, Brasília, DF, 18 de março de 2005. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf> Acesso em: 06 Jun. 2016.

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 2914**, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html> Acesso em: 06 Jun. 2016.

CAÑIZARES, P.; MARTÍNEZ, F.; RODRIGO, M. A.; JIMÉNEZ, Carlos; SÁEZ, Cristina; LOBATO, Justo. **Modeling of wastewater electrocoagulation processes Part II: Application to dye-polluted wastewaters and oil-in-water emulsions**. Separation and Purification Technology, v.60, p. 147-161, 2008.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade das águas interiores no Estado de São Paulo**. Apêndice A - Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem. São Paulo, 2009.

CHEN, G. **Electrochemical technologies in wastewater treatment**. Separation and Purification Technology, v.38, p. 11-41, 2004.

DANESHVAR, N.; OLADEGARAGOZE A.; DJAFARZADEH N. **Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters**. Journal of HazardousMaterials B129, p. 116-122, 2006.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2 ed. São Carlos: Editora Rima, 2005.

DROSTE, R. L. **Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment**.Primeira Edição. Wiley. 1994.

FERRAREZE, C. 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.

FUNASA - Fundação Nacional de Saúde. **Panorama do Saneamento Rural no Brasil.** 2017. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/site/engenharia-de-saude-publica-2/saneamento-rural/panorama-do-saneamento-rural-no-brasil/> Acesso em: 28 Mar. 2017.

HOLT, P**. Electrocoagulation: Unravelling and synthesising the mechanisms behind a water treatment process**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química. Universidade de Sidney. 2002.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatítica. **Atlas de Saneamento. 2011**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/default_zip.shtm> Acesso em: 28Mar. 2017.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatítica. **Censo demográfico 2010** - Características da população e dos domicílios - Resultados do universo. Rio de Janeiro, 2011. 270 p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatítica. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. 2008. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf> Acesso em: 4 Jun. 2016.

IWAMURA, V. C. **Associação da Moringa oleifera e do sulfato de alumínio com o processo de eletrocoagulação para a redução dos parâmetros físico-químicos da água**. 74 f. 2016. TCC (Graduação em Engenharia Ambiental), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2016.

JIANG, J.; GRAHAM, N.; ANDRÉ, C.; KELSALL, G. H.; BRANDON, N. **Laboratory study of electro-coagulation-flotation for water treatment**. Water Research 36, 2002.

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

MARCIONILIO, S. M. L.O.; BARROS, V. V.S.; LÉON, J. J. L. **Avaliação da coagulação química e eletrocoagulação no tratamento de efluente de polo farmacêutico**. RQI - Edição Eletrônica 7, v.749, Outubro, 2015.

MOLLAH, M. Y. A.; SCHENNACH, R.; PARGA, J. R.; COCKE, D. L. **Electrocoagulation (EC) - Science and applications**. Journal of Hazardous Materials B84, p. 29-41, 2001.

MOLLAH, M. Y. A.; SAURABH, P. R.; PATIL, P. K.; VAYUVEGULA, M.; AGRAWAL, T. S.; GOMES, J. A. G.; KESMEZ, M.; COCKE, D. L. **Treatment of orange II azo-dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes**. Journal of Hazardous Materials B109, p. 165-171, 2004.

MOLLAH, M. Y. A.; MORKOVSKY, P.; GOMES, J. A. G.; KESMEZ, M.; PARGA, J.; COCKE, D. L. **Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation**. Journal of HazardousMaterials B114, p. 199-210, 2004.

ORGANIZAÇÕES DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **The United Nations World Water Development Report 2015**. Disponível em: <http:// http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002318/231823E.pdf>. Acessoem 06 de Jun. 2016.

PATNAIK, P. **Handbook of Inorganic Chemicals**. Primeira Edição. McGraw-Hill Professional. 2003.

PAVANELLI, G. **Eficiência 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.

PEIXOTO, J. **Análises Físico-Químicas: cor, turbidez, pH, temperatura, alcalinidade e dureza**. Apostila de Laboratórios de Tecnologias Ambientais. Mestrado Integrado em Engenharia Biológica. Universidade do Minho, Braga, 2007.

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: 06 Jun. 2016.

SAROHA, A. K., KHANDEGAR, V. **Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent - A review**. Journal of Environmental Management 128, p. 949-963, 2013.

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

VANACÔR, R. N. **Avaliação do coagulante orgânico *Veta organic* utilizado em uma estação de tratamento de água para abstecimento público**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Apêndice A.1 - Primeira amostragem: dados do tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de sódio. 70

Apêndice A.2 - Primeira amostragem: dados do tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de potássio. 71

Apêndice A.3 - Primeira amostragem: eficiência de remoção de cor aparente e turbidez para o tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de sódio. 71

Apêndice A.4 - Primeira amostragem: eficiência de remoção de cor aparente e turbidez para o tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de potássio. . 73

Apêndice A.5 - Primeira amostragem: dados da corrente elétrica, desgaste do eletrodo experimental e desgaste do eletrodo teórico. 74

APÊNDICE B

Apêndice B.1 - Segunda amostragem: dados do tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de sódio. 75

Apêndice B.2 - Segunda amostragem: dados do tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de potássio. 76

Apêndice B.3 - Segunda amostragem: eficiência de remoção de cor aparente e turbidez para o tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de sódio. 77

Apêndice B.4 - Segunda amostragem: eficiência de remoção de cor aparente e turbidez para o tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de potássio. . 78

Apêndice B.5 - Segunda amostragem: dados da corrente elétrica, desgaste do eletrodo experimental e desgaste do eletrodo teórico. 79

Apêndice A.1 - Primeira amostragem: dados do tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de sódio.

Ensaio	Concentração de NaCl	Tempo (min)	Cor aparente (mgPtCo.L^{-1})	Turbidez (NTU)	Condutividade elétrica (µS.cm^{-1})	pH	Temperatura (ºC)
EC A1	0 mg.L^{-1}	20	437,0	89,1	150,0	7,07	26
		40	530,0	129,0	150,0	7,12	26
		60	307,0	94,7	140,0	7,13	26
		80	246,0	76,1	140,0	7,13	26
NaCl A1 1	1 mg.L^{-1}	20	389,0	88,6	160,0	7,14	26
		40	806,0	168,0	150,0	7,16	26
		60	502,0	111,0	150,0	7,17	26
		80	260,0	38,9	140,0	7,08	27
NaCl A1 2	2 mg.L^{-1}	20	443,0	100,0	160,0	7,04	27
		40	924,0	193,0	160,0	7,35	27
		60	1183,0	250,0	150,0	7,51	27
		80	678,0	155,0	140,0	7,53	27
NaCl A1 3	3 mg.L^{-1}	20	553,0	133,0	180,0	7,52	27
		40	432,0	73,0	180,0	7,52	27
		60	371,0	105,0	180,0	7,53	27
		80	448,0	102,0	170,0	7,54	27
NaCl A1 4	4 mg.L^{-1}	20	732,0	166,0	170,0	7,23	27
		40	385,0	159,0	170,0	7,24	27
		60	145,0	38,8	160,0	7,27	27
		80	159,0	21,2	150,0	7,58	27
NaCl A1 5	5 mg.L^{-1}	20	717,0	167,0	170,0	7,17	27
		40	1240,0	301,0	160,0	7,23	27
		60	273,0	103,0	160,0	7,07	27
		80	365,0	122,0	160,0	7,1	27

Fonte: Autoria própria (2017).

Apêndice A.2 - Primeira amostragem: dados do tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de potássio.

Ensaio	Concentração de KCl	Tempo (min)	Cor aparente (mgPtCo.L^{-1})	Turbidez (NTU)	Condutividade elétrica (µS.cm^{-1})	pH	Temperatura (ºC)
Amostra Bruta	NA	NA	128,0	47,1	99,9	8,10	27
EC A1	0 mg.L^{-1}	20	437,0	89,1	150,0	7,07	26
		40	530,0	129,0	150,0	7,12	26
		60	307,0	94,7	140,0	7,13	26
		80	246,0	76,1	140,0	7,13	26
KCl A1 1	1 mg.L^{-1}	20	522,0	104,0	160,0	6,56	24
		40	1138,0	231,0	150,0	6,79	24
		60	848,0	253,0	150,0	6,99	24
		80	231,0	69,2	140,0	7,07	25
KCl A1 2	2 mg.L^{-1}	20	490,0	115,0	160,0	7,32	25
		40	1144,0	269,0	160,0	7,39	25
		60	855,0	251,0	150,0	7,46	25
		80	399,0	140,0	140,0	7,61	26
KCl A1 3	3 mg.L^{-1}	20	552,0	127,0	160,0	7,69	26
		40	1313,0	286,0	160,0	7,87	26
		60	355,0	118,0	150,0	7,63	26
		80	395,0	116,0	150,0	7,75	26
KCl A1 4	4 mg.L^{-1}	20	648,0	150,0	170,0	7,13	26
		40	544,0	181,0	170,0	7,07	26
		60	274,0	104,0	170,0	7,02	27
		80	319,0	79,0	170,0	6,92	27
KCl A1 5	5 mg.L^{-1}	20	1028,0	201,0	170,0	7,08	27
		40	296,0	79,8	170,0	6,9	27
		60	225,0	60,2	170,0	6,5	27
		80	302,0	65,2	160,0	5,77	27

Fonte: Autoria própria (2017).

Apêndice A.3 - Primeira amostragem: eficiência de remoção de cor aparente e turbidez para o tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de sódio.

Ensaio	Concentração de NaCl	Tempo (min)	Eficiência de remoção de cor aparente (%)	Eficiência de remoção de turbidez (%)
EC A1	0 $mg.L^{-1}$	20	-241,41	-89,17
		40	-314,06	-173,89
		60	-139,84	-101,06
		80	-92,19	-61,57
NaCl A1 1	1 $mg.L^{-1}$	20	-203,91	-88,11
		40	-529,69	-256,69
		60	-292,19	-135,67
		80	-103,13	17,41
NaCl A1 2	2 $mg.L^{-1}$	20	-246,09	-112,31
		40	-621,88	-309,77
		60	-824,22	-430,79
		80	-429,69	-229,09
NaCl A1 3	3 $mg.L^{-1}$	20	-332,03	-182,38
		40	-237,50	-54,99
		60	-189,84	-122,93
		80	-250,00	-116,56
NaCl A1 4	4 $mg.L^{-1}$	20	-471,88	-252,44
		40	-200,78	-237,58
		60	-13,28	17,62
		80	-24,22	54,99
NaCl A1 5	5 $mg.L^{-1}$	20	-460,16	-254,56
		40	-868,75	-539,07
		60	-113,28	-118,68
		80	-185,16	-159,02

Fonte: Autoria própria (2017).

Apêndice A.4 - Primeira amostragem: eficiência de remoção de cor aparente e turbidez para o tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de potássio.

Ensaio	Concentração de KCl	Tempo (min)	Eficiência de remoção de cor aparente (%)	Eficiência de remoção de turbidez (%)
EC A1	0 mg.L^{-1}	20	-241,41	-89,17
		40	-314,06	-173,89
		60	-139,84	-101,06
		80	-92,19	-61,57
KCl A1 1	1 mg.L^{-1}	20	-307,81	-120,81
		40	-789,06	-390,45
		60	-562,50	-437,15
		80	-80,47	-46,92
KCl A1 2	2 mg.L^{-1}	20	-282,81	-144,16
		40	-793,75	-471,13
		60	-567,97	-432,91
		80	-211,72	-197,24
KCl A1 3	3 mg.L^{-1}	20	-331,25	-169,64
		40	-925,78	-507,22
		60	-177,34	-150,53
		80	-208,59	-146,28
KCl A1 4	4 mg.L^{-1}	20	-406,25	-218,47
		40	-325,00	-284,29
		60	-114,06	-120,81
		80	-149,22	-67,73
KCl A1 5	5 mg.L^{-1}	20	-703,13	-326,75
		40	-131,25	-69,43
		60	-75,78	-27,81
		80	-135,94	-38,43

Fonte: Autoria própria (2017).

Apêndice A.5 - Primeira amostragem: dados da corrente elétrica, desgaste do eletrodo experimental e desgaste do eletrodo teórico.

Ensaio	Corrente elétrica (A)	Massa inicial do eletrodo (g)	Massa final do eletrodo (g)	Desgaste do eletrodo experimental (g)	Desgaste do eletrodo teórico (g)
EC A1	0,12	1564,18	1564,15	0,030	0,042
NaCl A1 1	0,09	1564,48	1563,35	1,130	0,031
NaCl A1 2	0,07	1563,68	1564,08	-0,400	0,024
NaCl A1 3	0,08	1563,33	1563,35	-0,020	0,028
NaCl A1 4	0,07	1562,93	1565,61	-2,680	0,024
NaCl A1 5	0,07	1562,84	1564,06	-1,220	0,024
KCl A1 1	0,07	1561,75	1561,70	0,050	0,024
KCl A1 2	0,06	1561,07	1561,92	-0,850	0,021
KCl A1 3	0,06	1561,11	1561,43	-0,320	0,021
KCl A1 4	0,07	1560,50	1562,16	-1,660	0,024
KCl A1 5	0,08	1561,37	1561,87	-0,500	0,028

Fonte: Autoria própria (2017).

Apêndice B.1 - Segunda amostragem: dados do tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de sódio.

Ensaio	Concentração de NaCl	Tempo (min)	Cor aparente ($mgPtCo.L^{-1}$)	Turbidez (NTU)	Condutividade elétrica ($\mu S.cm^{-1}$)	pH	Temperatura (ºC)
EC A2	0 $mg.L^{-1}$	20	310,0	64,7	160,0	6,05	28
		40	379,0	74,8	150,0	6,09	28
		60	158,0	32,3	150,0	6,13	28
		80	49,0	11,5	150,0	6,31	28
NaCl A2 1	1 $mg.L^{-1}$	20	347,0	70,2	150,0	7,14	28
		40	902,0	178,0	160,0	7,16	28
		60	1409,0	295,0	160,0	7,17	27
		80	1347,0	288,0	160,0	7,08	27
NaCl A2 2	2 $mg.L^{-1}$	20	464,0	93,7	160,0	7,04	27
		40	569,0	121,0	160,0	7,35	28
		60	10,0	7,8	160,0	7,51	28
		80	4,0	2,9	160,0	7,53	28
NaCl A2 3	3 $mg.L^{-1}$	20	555,0	112,0	170,0	7,52	27
		40	54,0	13,5	170,0	7,52	28
		60	0,0	5,0	160,0	7,53	28
		80	7,0	4,2	170,0	7,54	28
NaCl A2 4	4 $mg.L^{-1}$	20	503,0	112,0	170,0	7,23	28
		40	1302,0	264,0	170,0	7,24	28
		60	61,0	16,6	170,0	7,27	28
		80	22,0	5,5	170,0	7,58	28
NaCl A2 5	5 $mg.L^{-1}$	20	527,0	116,0	170,0	7,17	28
		40	1038,0	198,0	170,0	7,23	28
		60	19,0	9,4	180,0	7,07	28
		80	17,0	8,4	180,0	7,1	28

Fonte: Autoria própria (2017).

Apêndice B.2 - Segunda amostragem: dados do tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de potássio.

Ensaio	Concentração de KCl	Tempo (min)	Cor aparente ($mgPtCo.L^{-1}$)	Turbidez (NTU)	Condutividade elétrica ($\mu S.cm^{-1}$)	pH	Temperatura (ºC)
EC A2	0 $mg.L^{-1}$	20	310,0	64,7	160,0	6,05	28
		40	379,0	74,8	150,0	6,09	28
		60	158,0	32,3	150,0	6,13	28
		80	49,0	11,5	150,0	6,31	28
KCl A2 1	1 $mg.L^{-1}$	20	316,0	66,1	160,0	6,39	28
		40	381,0	78,7	160,0	6,43	28
		60	209,0	44,4	160,0	6,45	28
		80	36,0	11,2	160,0	6,47	28
KCl A2 2	2 $mg.L^{-1}$	20	380,0	77,7	160,0	6,42	28
		40	972,0	186,0	160,0	6,45	28
		60	1617,0	317,0	150,0	6,53	28
		80	102,0	29,5	140,0	6,79	28
KCl A2 3	3 $mg.L^{-1}$	20	441,0	96,0	150,0	6,56	27
		40	1109,0	218,0	160,0	6,79	27
		60	209,0	49,0	160,0	6,81	28
		80	36,0	9,2	160,0	6,83	27
KCl A2 4	4 $mg.L^{-1}$	20	409,0	89,4	160,0	6,55	28
		40	1067,0	227,0	170,0	6,60	27
		60	242,0	59,9	170,0	6,67	28
		80	28,0	9,1	170,0	6,70	28
KCl A2 5	5 $mg.L^{-1}$	20	336,0	74,2	170,0	6,62	28
		40	970,0	195,0	170,0	6,68	28
		60	444,0	95,2	170,0	6,71	28
		80	78,0	16,9	170,0	6,74	28

Fonte: Autoria própria (2017).

Apêndice B.3 - Segunda amostragem: eficiência de remoção de cor aparente e turbidez para o tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de sódio.

Ensaio	Concentração de NaCl	Tempo (min)	Eficiência de remoção de cor aparente (%)	Eficiência de remoção de turbidez (%)
EC A2	0 $mg.L^{-1}$	20	-240,66	-93,71
		40	-316,48	-123,95
		60	-73,63	3,29
		80	46,15	65,57
NaCl A2 1	1 $mg.L^{-1}$	20	-281,32	-110,18
		40	-891,21	-432,93
		60	-1448,35	-783,23
		80	-1380,22	-762,28
NaCl A2 2	2 $mg.L^{-1}$	20	-409,89	-180,54
		40	-525,27	-262,28
		60	89,01	76,62
		80	95,60	91,44
NaCl A2 3	3 $mg.L^{-1}$	20	-509,89	-235,33
		40	40,66	59,58
		60	100,00	85,06
		80	92,31	87,40
NaCl A2 4	4 $mg.L^{-1}$	20	-452,75	-235,33
		40	-1330,77	-690,42
		60	32,97	50,30
		80	75,82	83,50
NaCl A2 5	5 $mg.L^{-1}$	20	-479,12	-247,31
		40	-1040,66	-492,81
		60	79,12	71,83
		80	81,32	74,85

Fonte: Autoria própria (2017).

Apêndice B.4 - Segunda amostragem: eficiência de remoção de cor aparente e turbidez para o tratamento da eletrocoagulação associada ao cloreto de potássio.

Ensaio	Concentração de KCl	Tempo (min)	Eficiência de remoção de cor aparente (%)	Eficiência de remoção de turbidez (%)
EC A2	0 mg.L^{-1}	20	-240,66	-93,71
		40	-316,48	-123,95
		60	-73,63	3,29
		80	46,15	65,57
KCl A2 1	1 mg.L^{-1}	20	-247,25	-97,90
		40	-318,68	-135,63
		60	-129,67	-32,93
		80	60,44	66,47
KCl A2 2	2 mg.L^{-1}	20	-317,58	-132,63
		40	-968,13	-456,89
		60	-1676,92	-849,10
		80	-12,09	11,68
KCl A2 3	3 mg.L^{-1}	20	-384,62	-187,43
		40	-1118,68	-552,69
		60	-129,67	-46,71
		80	60,44	72,46
KCl A2 4	4 mg.L^{-1}	20	-349,45	-167,66
		40	-1072,53	-579,64
		60	-165,93	-79,34
		80	69,23	72,81
KCl A2 5	5 mg.L^{-1}	20	-269,23	-122,16
		40	-965,93	-483,83
		60	-387,91	-185,03
		80	14,29	49,40

Fonte: Autoria própria (2017).

Apêndice B.5 - Segunda amostragem: dados da corrente elétrica, desgaste do eletrodo experimental e desgaste do eletrodo teórico.

Ensaio	Corrente elétrica (A)	Massa inicial do eletrodo (g)	Massa final do eletrodo (g)	Desgaste do eletrodo experimental (g)	Desgaste do eletrodo teórico (g)
EC A2	0,20	1562,81	1562,85	-0,040	0,069
NaCl A2 1	0,16	1562,44	1562,38	0,060	0,056
NaCl A2 2	0,17	1561,86	1561,79	0,070	0,059
NaCl A2 3	0,18	1561,42	1561,33	0,090	0,063
NaCl A2 4	0,18	1561,47	1562,93	-1,460	0,063
NaCl A2 5	0,16	1561,84	1562,06	-0,220	0,056
KCl A2 1	0,15	1561,75	1561,37	0,380	0,052
KCl A2 2	0,15	1561,22	1560,85	0,370	0,052
KCl A2 3	0,16	1560,34	1561,11	-0,770	0,056
KCl A2 4	0,16	1560,92	1561,51	-0,590	0,056
KCl A2 5	0,15	1560,48	1560,23	0,250	0,052

Fonte: Autoria própria (2017).