



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA



UNIDADE ACADEMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MARIANA RODRIGUES DE MEDEIROS

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM REATOR ELETROLÍTICO
PARA DESINFECÇÃO DE ÁGUAS CONTAMINADAS COM *ESCHERICHIA COLI*

CAMPINA GRANDE

2018

MARIANA RODRIGUES DE MEDEIROS

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM REATOR ELETROLÍTICO
PARA DESINFECÇÃO DE ÁGUAS CONTAMINADAS COM *ESCHERICHIA COLI*

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal de Campina Grande como requisito à obtenção do Título de Doutora em Engenharia Química.

Área de concentração: Recursos Regionais e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Kepler Borges França

Co-orientador: Prof. Dr. Howard William Pearson

Campina Grande

2018

M488d Medeiros, Mariana Rodrigues de.
Desenvolvimento e caracterização de um reator eletrolítico para
desinfecção de águas contaminadas com *Escherichia Coli* / Mariana
Rodrigues de Medeiros. – Campina Grande, 2018.
119 f : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Kepler Borges França, Prof. Dr. Howard William
Pearson".

Referências.

1. *Escherichia Coli*. 2. Reator Eletrolítico. 3. Campo Elétrico. 4.
Desinfecção. I. França, Kepler Borges. II. Pearson, Howard William. III.
Título.

CDU 661.96(043)

NOME: MARIANA RODRIGUES DE MEDEIROS

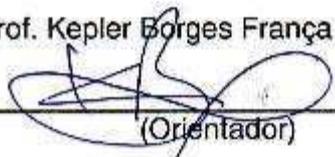
TÍTULO: DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM REATOR ELETROLÍTICO PARA DESINFECÇÃO DE ÁGUAS CONTAMINADAS COM *ESCHERICHIA COLI*

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal de Campina Grande como requisito à obtenção do Título de Doutora em Engenharia Química.

Aprovado em: 10 / 04 / 2018

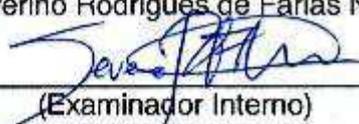
COMISSÃO EXAMINADORA

CONCEITO

Prof. Kepler Borges França (Doutor)


(Orientador)

Aprovado

Prof. Severino Rodrigues de Farias Neto (Doutor)


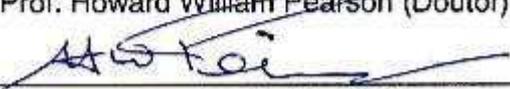
(Examinador Interno)

Aprovado

Prof. Hervé Michel Laborde (Doutor)


(Examinador Interno)

APROVADO

Prof. Howard William Pearson (Doutor)


(Examinador Externo)

Aprovado

Prof. Fernando Fernandes Vieira (Doutor)


(Examinador Externo)

APROVADO

Dedico este trabalho ao meu pai Francisco (Chico), por toda a dedicação, carinho, amor e ensinamentos ao longo dos nossos quatorze anos de convivência (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que me trouxe paz e espiritualidade em todo o processo de realização deste trabalho.

A minha mãe Carmen e irmãs Talita e Thaís, que sempre estiveram ao meu lado nos momentos de alegrias e dificuldades, me incentivando a ser justa, paciente e otimista com a vida.

Aos meus demais familiares, especialmente meus avós, tios e primos paternos, pelos incontáveis momentos de confraternização e intensas demonstrações de afeto e apoio. A minha avó Dalcira pela serenidade e carinho. As minhas tias Rossana e Sílvia, que me proporcionaram estadia e apoio no período de estágio em outra cidade.

Aos amigos Felipe, Any, Daniela, Jaqueline, Janine, pelos momentos de lazer, descontração e apoio emocional.

Aos colegas do LABDES, Karine, Theódulo, Maniza, Manoel, Sonáli, Rodrigo, Kelly, João e Henrique, pelo apoio nos questionamentos referentes à pesquisa, pelos momentos de descontração, conversas e por toda a ajuda que me deram ao longo da minha permanência no laboratório.

Ao meu namorado Pablo pela enorme parceria e incentivo na vida e no trabalho. Por toda a compreensão, amor, otimismo e bom humor demonstrados diariamente.

Ao meu orientador Kepler e Co-orientador Howard, por me fazerem acreditar na importância desse trabalho, e pela disponibilidade de ambos em esclarecer minhas dúvidas e em cada ajuda na execução de cada etapa da pesquisa.

Aos professores Severino, Fernando, e Hervé pela disponibilidade em compor esta banca de tese, juntamente ao meu orientador Kepler e Co-orientador Howard.

À instituição UFCG pelo enorme aprendizado e incentivo acadêmico ao longo de toda a minha jornada de estudos, e à coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Química, que se mostrou extremamente disponível a ajudar em tudo o que precisei durante o Mestrado e Doutorado.

Aos professores e funcionários da UFCG que auxiliaram na minha formação e me proporcionaram todo o incentivo para acreditar nos meus projetos.

A agência financiadora CAPES, por ter custeado toda a minha permanência na pós-graduação.

“Se pensar é o destino do ser humano, continuar sonhando é o seu grande desafio. E isto, é lógico, implica em trajetórias com riscos, em vitórias, com muitas lutas, e não poucos obstáculos pelo caminho. Apesar de tudo, seja ousado. Liberte sua criatividade. E nunca desista de seus sonhos, pois eles transformarão sua vida em uma grande aventura”. (Augusto Cury)

Medeiros, M. R. Desenvolvimento e caracterização de um reator eletrolítico para desinfecção de águas contaminadas com *Escherichia coli* [Tese]. Campina Grande: Programa de pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande; 2018.

RESUMO

A inativação de bactérias patogênicas é um requisito fundamental no tratamento de água potável. Os avanços na pesquisa de tratamento de água têm sido direcionados para a aplicação de tecnologias que usam menos reagentes químicos, reduzindo assim a formação de subprodutos tóxicos e reduzindo o tempo de operação. Para tanto, objetivou-se projetar e avaliar a eficiência de um reator eletrolítico de bancada, composto pelo par de eletrodos: esponja de níquel (ânodo) e fibra de carbono (cátodo), operando de forma contínua, na desinfecção da bactéria indicadora *Escherichia coli* (*E. coli*). Inicialmente, os ensaios foram realizados com água de abastecimento público do LABDES/UFCG, contaminada em laboratório com uma concentração constante, avaliando os efeitos da aplicação das diferenças de potenciais (ddp) de 3,0 V, 5,0 V, 7,0 V e 9,0 V nos respectivos tempos médios de residência (t_m): 46,8 s, 65,4 s, 82,2 s e 121,8 s, estimados experimentalmente através do método de injeção de uma solução traçadora (NaCl), nas vazões de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 L.min⁻¹, respectivamente, nos parâmetros físico-químicos e na desinfecção de *E. coli* dessa água. Posteriormente, foi proposto o estudo do desempenho do reator em relação aos mesmos parâmetros (condutividade elétrica, pH, turbidez e cor), acrescentando a análise de concentração de cloreto (Cl⁻). Nessa etapa, foram consideradas maiores faixas de ddp e um tempo médio de residência constante (121,8s), e avaliando diferentes tipos de águas (deionizada, solução de NaCl, água de abastecimento público de Campina Grande) sem e com contaminação de *E. coli*. Os resultados obtidos, em termos de percentuais de desinfecção de *E. coli* na água do LABDES, mostraram que sob as ddp de 5,0 e 7,0 V, esses percentuais foram de 99,84 e 99,40%, respectivamente para o maior tempo de residência (121,8 s). Nos experimentos realizados com as outras águas, chegou-se a 100% de desinfecção de *E. coli* na solução de NaCl contaminada com 10³ UFC.mL⁻¹, nas densidades de corrente de 9,4 e 11,89 mA.cm⁻², respectivamente, e na água de abastecimento público de Campina Grande nessa mesma ordem de concentração de bactéria, a desinfecção se mostrou 100% eficaz nas densidades de corrente de 9,92, 11,1 e 11,7 mA.cm⁻². Os resultados mostram que a proposta do trabalho em remover grande parte ou 100% de *E. coli* de águas, principalmente as águas de consumo humano, foi alcançada.

Palavras-chave: *Escherichia coli*, Reator eletrolítico; campo elétrico, desinfecção.

Medeiros, M. R. Development and characterization of an electrolytic reactor for disinfection of water contaminated with *Escherichia coli* [Thesis]. Campina Grande: Graduate Program in Chemical Engineering, Federal University of Campina Grande; 2018.

ABSTRACT

Inactivation of pathogenic bacteria is a fundamental requirement in the treatment of drinking water. Advances in water treatment research have been directed toward the application of technologies that use fewer chemical reagents, thereby reducing the formation of toxic byproducts and reducing the time of operation. The objective of this study was to design and evaluate the efficiency of an electrolytic bench reactor composed of the electrode pair: nickel sponge (anode) and carbon fiber (cathode), continuously operating in the disinfection of the indicator bacterium *Escherichia coli* (*E. coli*). Initially, the tests were carried out with LABDES / UFCG public contaminated water in a laboratory with a constant concentration, evaluating the effects of applying the potential differences (ddp) of 3.0 V, 5.0 V, 7.0 V and 9.0 V in the respective average residence times (t_m): 46.8 s, 65.4 s, 82.2 s and 121.8 s, estimated experimentally by the method of injection of a tracer solution (NaCl) at the flow rates of 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 L.min⁻¹, respectively, in the physico-chemical parameters and in the disinfection of *E. coli* from this water. Subsequently, it was proposed to study the performance of the reactor in relation to the same parameters (electrical conductivity, pH, turbidity and color), adding the analysis of chloride concentration (Cl⁻). In this step, we considered greater ranges of ddp and a mean constant residence time (121.8s), and evaluating different types of water (deionized, NaCl solution, public supply water of Campina Grande) without and with *E. coli* contamination. The results obtained, in terms of percentages of disinfection of *E. coli* in LABDES water, showed that under the ddp of 5.0 and 7.0 V, these percentages were 99.84 and 99.40%, respectively, for the highest time of residence (121.8 s). In the experiments performed with the other waters, 100% disinfection of *E. coli* was achieved in NaCl solution contaminated with 103 CFU.mL⁻¹, at current densities of 9.4 and 11.89 mA.cm⁻², respectively, and in the public supply water of Campina Grande in the same order of concentration of bacteria, disinfection was 100% efficient at current densities of 9.92, 11.1 and 11.7 mA.cm⁻². The results show that the proposal of the work to remove much or 100% of *E. coli* from waters, mainly waters of human consumption, was reached.

Key words: *Escherichia coli*, Electrolytic reactor; electric field, disinfection.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1. Esquemática do mecanismo de desinfecção de microrganismos	10
Figura 2.2. Efeito do campo elétrico pulsado sobre a célula de um microrganismo	17
Figura 2.3. Injeção e detecção do traçador inerte.....	21
Figura 2.4. Esquemas de injeções de perturbações em pulso (a) e em degrau (b).....	21
Figura 2.5. Diferentes comportamentos de curvas respostas para a injeção de perturbação tipo pulso.....	24
Figura 3.1. Fluxograma do processo de tratamento da alimentação do sistema no reator eletrolítico.....	27
Figura 3.2. Componentes do reator eletrolítico. (A) eletrodo de esponja de Níquel. (B) eletrodo de fibra de Carbono. (C) configuração dos eletrodos no interior do tubo de PVC.....	29
Figura 3.3. Injeção de perturbação em pulso	27
Figura 3.4. Utensílios e condutivímetro para monitoramento de condutividade elétrica na saída do sistema	29
Figura 3.5. Representação esquemática do fluxograma do processo eletrolítico	31
Figura 3.6. Sistema eletrolítico montado em bancada de trabalho	32
Figura 3.7. (A) Coleta de água residual em lagoa da UFCG; (B) Filtragem da água coletada; (C) Filtrado em meio de cultura pronto para incubação	Erro! Indicador não definido.
Figura 3.8. (A) Bactérias filtradas e incubadas em meio sólido; (B) Estriamento de uma amostra de bactérias incubadas em meio sólido	33
Figura 3.9. Colônia de <i>E. coli</i> isolada (A); difusão de colônia isolada em meio de cultura líquido (B); meio de cultura contaminado com <i>E. coli</i> (C).....	39
Figura 3.10. Método de diluição de amostras para filtragem	37
Figura 4.1. Perfil da média das curvas $k(t)$ em função do tempo para os Experimentos I, II e III ($Q = 0,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$).....	46
Figura 4.2. Perfil da curva de distribuição do tempo de residência (DTR) ($Q = 0,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)...	47
Figura 4.3. Perfil da curva do produto de $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 0,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$).....	48

Figura 4.4. Perfil da média das curvas $k(t)$ em função do tempo para os Experimentos I, II e III ($Q = 1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)	49
Figura 4.5. Perfil da curva de distribuição do tempo de residência (DTR) ($Q = 1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)	Erro! Indicador não definido.
Figura 4.6. Perfil da curva do produto de $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)	49
Figura 4.7. Perfil da média das curvas $k(t)$ em função do tempo para os Experimentos I, II e III ($Q = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)	50
Figura 4.8. Curva da distribuição do tempo de residência (DTR) ($Q = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)	50
Figura 4.9. Perfil da curva do produto de $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$). Erro! Indicador não definido.	
Figura 4.10. Perfil da média das curvas $k(t)$ em função do tempo para os Experimentos I, II e III ($Q = 2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)	51
Figura 4.11. Curva da distribuição do tempo de residência (DTR) ($Q = 2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)	53
Figura 4.12. Perfil da curva do produto de $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)	54
Figura 4.13. Variação do pH em função do tempo de residência do reator eletrolítico para as respectivas diferenças de potenciais	58
Figura 4.14. Comportamento da turbidez em função dos tempos de residência para as respectivas diferenças de potenciais	59
Figura 4.15. Comportamento da cor em função do tempo médio de residência para as respectivas diferenças de potenciais	53
Figura 4.16. Comportamento da variação da concentração de <i>E. coli</i> e o percentual de desinfecção em função do tempo de residência na ddp = 3,0V	54
Figura 4.17. Variação de colônias de <i>E. coli</i> e porcentagem de desinfecção com o tempo de residência na ddp = 5,0V	58
Figura 4.18. Variação de colônias de <i>E. coli</i> e porcentagem de desinfecção com o tempo de residência na ddp = 7,0V	59
Figura 4.19. Variação de colônias de <i>E. coli</i> e porcentagem de desinfecção com o tempo de residência na ddp = 9,0V	60
Figura 4.20. Estudo comparativo da condutividade elétrica em função da variação de densidade de corrente elétrica entre a água deionizada sem e com <i>E. coli</i>	61
Figura 4.21. Estudo comparativo do pH em função da variação de densidade de corrente elétrica entre a água deionizada sem e com <i>E. coli</i>	67

Figura 4.22. Estudo comparativo da Turbidez em função da variação de densidade de corrente elétrica entre a água deionizada sem e com <i>E. coli</i>	68
Figura 4.23. Estudo comparativo da concentração de Cl ⁻ em função da variação de densidade de corrente elétrica entre a água deionizada sem e com <i>E. coli</i>	69
Figura 4.24. Estudo da concentração de <i>E. coli</i> em função da densidade de corrente elétrica para a água deionizada	66
Figura 4.25. Estudo comparativo da condutividade elétrica em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as soluções de NaCl sem e com <i>E. coli</i>	67
Figura 4.26. Estudo comparativo do pH em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as soluções de NaCl sem e com <i>E. coli</i>	68
Figura 4.27. Estudo comparativo da Turbidez em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as soluções de NaCl sem e com <i>E. coli</i>	69
Figura 4.28. Estudo comparativo da Cor em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as soluções de NaCl sem e com <i>E. coli</i>	70
Figura 4.29. Estudo comparativo dos teores de Cloreto em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as soluções de NaCl sem e com <i>E. coli</i>	77
Figura 4.30. Estudo da concentração de <i>E. coli</i> em função da densidade de corrente elétrica para a solução de NaCl	78
Figura 4.31. Estudo comparativo da condutividade elétrica em função da variação de densidade de corrente elétrica entre a água de abastecimento público sem e com <i>E. coli</i> ...	75
Figura 4.32. Estudo comparativo do pH em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as águas de abastecimento sem e com <i>E. coli</i>	76
Figura 4.33. Estudo comparativo da Turbidez em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as águas de abastecimento público sem e com <i>E. coli</i>	77
Figura 4.34. Estudo comparativo da Cor em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as águas de abastecimento sem e com <i>E. coli</i>	78
Figura 4.35. Estudo comparativo da concentração de Cl ⁻ em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as águas de abastecimento sem e com <i>E. coli</i>	81
Figura 4.36. Estudo da desinfecção de <i>E. coli</i> em função da densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento (<i>E. coli</i> = 10 ³ UFC.mL ⁻¹).....	86
Figura 4.37. Condutividade elétrica em função da variação de densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento (<i>E. coli</i> = 10 ⁵ UFC.mL ⁻¹).....	87

Figura 4.38. pH em função da variação de densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento (<i>E. coli</i> = 10^5 UFC.mL ⁻¹).....	88
Figura 4.39. Turbidez em função da variação de densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento (<i>E. coli</i> = 1×10^5 UFC.mL ⁻¹).....	89
Figura 4.40. Cor em função da variação de densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento (<i>E. coli</i> = 10^5 UFC.mL ⁻¹).....	86
Figura 4.41. Concentração de Cl ⁻ em função da variação de densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento (<i>E. coli</i> = 10^5 UFC.mL ⁻¹).....	87
Figura 4.42. Estudo da concentração de <i>E. coli</i> em função da densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento (<i>E. coli</i> = 10^5 UFC.mL ⁻¹).....	88
Figura 4.43. Variação da concentração de Níquel em função da diferença de potencial	89
Figura 4.44. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) para amostra de esponja de níquel sem uso, ampliada em 200x.....	90
Figura 4.45. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) para amostra de esponja de níquel após eletrólise. (A) Ampliação em 100x. (B) Ampliação em 1000x	95
Figura 4.46. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) para amostras de fibra de carbono sem e com exposição à eletrólise. (A) ampliação em 500x. (B) ampliação em 1000x	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Padrão microbiológico da água para consumo humano.....	5
Tabela 2.2. Parâmetros organolépticos de potabilidade da água.....	306
Tabela 3.1. Especificações da origem, níveis de contaminação de <i>E. coli</i> inseridos nos fluidos de alimentação e potenciais elétricos aplicados ao sistema eletrolítico.....	28
Tabela 3.2. Composição e dimensionamento do reator eletrolítico.....	30
Tabela 3.3. Composição e quantificação do meio de cultura Modified Scholtens' Broth (MSB).....	30
Tabela 3.4. Composição e quantificação do meio de cultura T.B.X MEDIUM OXOID.....	39
Tabela 4.1. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $k(t)$ em função do tempo.....	47
Tabela 4.2. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $t \times E(t)$ em função do tempo.....	48
Tabela 4.3. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $k(t)$ em função do tempo ($Q = 1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$).....	48
Tabela 4.4. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$).....	51
Tabela 4.5. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $k(t)$ em função do tempo ($Q = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$).....	51
Tabela 4.6. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$).....	52
Tabela 4.7. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $k(t)$ em função do tempo ($Q = 2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$).....	53
Tabela 4.8. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$).....	54
Tabela 4.9. Dados dos parâmetros físico-químicos, condições eletroquímicas e de tempo médio de residência, bem como a contagem de <i>E. coli</i> em amostras de água antes de após a eletrólise no sistema	56
Tabela 4.10. Parâmetros físico-químicos e de operação do sistema eletrolítico para a água deionizada sem <i>E. coli</i>	65
Tabela 4.11. Parâmetros físico-químicos; de operação do sistema eletrolítico e bacteriológicos para a água deionizada com <i>E. coli</i>	65

Tabela 4.12. Parâmetros físico-químicos e de operação do sistema eletrolítico para a solução de NaCl sem <i>E. coli</i>	72
Tabela 4.13. Parâmetros físico-químicos, de operação do sistema eletrolítico e contagem de <i>E. coli</i> para a solução de NaCl com <i>E. coli</i>	72
Tabela 4.14. Parâmetros físico-químicos e de operação do sistema eletrolítico para a água de abastecimento público sem <i>E. coli</i>	79
Tabela 4.15. Parâmetros físico-químicos, de operação do sistema eletrolítico e parâmetros bacteriológicos para a água de abastecimento público com <i>E. coli</i>	80
Tabela 4.16. Parâmetros físico-químicos, de operação do sistema eletrolítico e parâmetro bacteriológico para a água de abastecimento público com <i>E. coli</i>	86
Tabela 4.17. Dados de concentrações de níquel nas amostras de água pelo método de absorção atômica com chama.....	93

LISTA DE SIGLAS

APHA - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater

AWWA - American Water Works Association

DTR – Distribuição de tempo de residência

ISO - International Standardization Organization

MSB - Modified Scholten's Broth

NTU – Unidades nefelométricas de turbidez

QSR - Quarter-strength Ringer's

UFC – Unidades formadoras de colônias

USEPA - United States Environmental Protection Agency

VMP – Valor máximo permissível

WEF - Water Environment Federation

WHO – World Health Organization

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω - Ohm

ρ - resistividade elétrica (Ωm)

R - resistência elétrica (Ω)

\vec{i} - corrente elétrica (A)

\vec{j} - densidade de corrente elétrica ($\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$)

ddp - diferença de potencial (V)

k - condutividade elétrica ($\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$)

μ - micro

S - siemens

$E(t)$ - função DTR

t_m - tempo médio de residência (s)

R^2 - coeficiente de determinação

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
1.1.1. Objetivo Geral	2
1.1.2. Objetivos Específicos.....	2
CAPÍTULO II	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Desinfecção da água	3
2.2 Padrões de potabilidade da água.....	4
2.3 Contaminação de água potável por microrganismos.....	6
2.4 Mecanismo de desinfecção eletroquímica de águas contaminadas com microrganismos	7
2.5 Fatores que influenciam no processo de desinfecção eletroquímica.....	10
2.5.1 Eletrodos utilizados	11
2.5.2 Distância entre eletrodos	12
2.5.3 Fonte de alimentação de corrente elétrica	13
2.5.4 Densidade de corrente elétrica	14
2.5.5 Concentração de íons	15
2.5.6 Efeito do parâmetro pH	16
2.6 Campo elétrico no processo de desinfecção.....	16
2.7 Efeito da eletrólise em água de abastecimento público contaminada com microrganismos	18
2.8 Fatores limitantes na eficiência da eletrólise da água	19
2.9 <i>Escherichia coli</i>	19
2.10 Estudo do tempo de residência em um reator	20
2.10.1 Medida da distribuição do tempo de residência (DTR)	21
2.10.2 Traçadores.....	22

2.10.3 Curva resposta à injeção de traçador do tipo pulso.....	22
2.10.4 Determinação das curvas da DTR	24
2.10.5. Tempo Médio de residência (t_m).....	25
CAPÍTULO III	26
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 Alimentação do sistema.....	28
3.2 Reator eletrolítico.....	29
3.3 Metodologia para determinação do tempo médio de residência (t_m)	30
3.3.1 Tratamento dos dados para estimativa do tempo médio de residência	32
3.4. Sistema eletrolítico.....	32
3.5. Metodologia das etapas experimentais	34
3.5.1- Etapa I.....	34
3.5.2 - Etapa II	35
3.6 Procedimentos para as análises de contagem de <i>E. coli</i> e dos parâmetros físico-químicos	36
3.6.1 Preparação do inóculo de <i>E. coli</i>	36
3.6.2 Composição e preparação do meio seletivo T.B.X para <i>E. coli</i>	39
3.6.3 Análises de contagem de colônias de <i>E. coli</i>	40
3.6.4 Análises Físico-químicas	42
3.7 Análise de níquel por Espectrometria de Absorção Atômica com chama.....	42
3.8 Análise de Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos eletrodos.....	43
3.9 Análise de variabilidade de dados.....	44
CAPÍTULO IV	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1 Tempo de residência	45
4.1.1 Tempo médio de residência (t_m).....	47
Etapa I	54

4.2 Efeito da diferença de potencial elétrico em função do tempo médio de residência no reator para uma concentração de <i>E. coli</i> de 10^5 UFC.mL ⁻¹	54
4.2.1 Análises dos parâmetros físico – químicos	57
4.2.3 Análise de parâmetros eletroquímicos versus concentrações de <i>E.coli</i>	60
Etapa II	64
4.3 Água deionizada	64
4.3.1 Condutividade elétrica (k)	66
4.3.2 pH.....	67
4.3.3 Turbidez (NTU)	68
4.3.4 Cloreto (mg.L ⁻¹).....	69
4.3.5 <i>E. coli</i> (UFC.mL ⁻¹)	70
4.4 Solução de NaCl.....	71
4.4.1 Condutividade elétrica (k)	73
4.4.2 pH.....	73
4.4.3 Turbidez (NTU)	75
4.4.4 Cor (uH).....	75
4.4.5 Cloreto (mg.L ⁻¹).....	76
4.4.6 <i>E. coli</i> (UFC.mL ⁻¹)	78
4.5 Água de abastecimento público (<i>E. coli</i> = 10^3 UFC.mL ⁻¹).....	79
4.5.1 Condutividade elétrica (k)	80
4.5.2 pH.....	81
4.5.3 Turbidez (NTU)	82
4.5.4 Cor (uH).....	83
4.5.5 Cloreto (mg.L ⁻¹).....	84
4.5.6 <i>E. coli</i> (UFC.mL ⁻¹)	85
4.6 Água de abastecimento (<i>E. coli</i> = 10^5 UFC.mL ⁻¹).....	86
4.6.1 Condutividade elétrica (k)	87
4.6.2 pH.....	87

4.6.3 Turbidez (NTU)	88
4.6.4 Cor (uH).....	89
4.6.5 Cloreto (mg.L ⁻¹).....	90
4.6.6 <i>E. coli</i> (UFC.mL ⁻¹)	91
4.7 Análise de níquel pelo método de absorção atômica com chama.....	92
4.8 Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para eletrodos.....	94
CAPÍTULO V	97
5. CONCLUSÕES	97
CAPÍTULO VI	99
6. PERSPECTIVAS FUTURAS	99
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
APÊNDICE A – Laudo de análise físico-química de uma amostra de água de abastecimento público da cidade de Campina Grande, realizada no LABDES (ano base 2016).	105
APÊNDICE B – Tabelas de dados experimentais em triplicata, obtidos no estudo do tempo médio de residência (t_m), para as vazões 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 L.min ⁻¹ , respectivamente.....	106
APÊNDICE C – curvas referentes às condutividades elétricas monitoradas na saída do sistema em função do tempo, para os ensaios em triplicata realizados para as vazões de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 L.min ⁻¹ , respectivamente.	111
APÊNDICE D – Tabelas de dados experimentais dos parâmetros físico químicos e da desinfecção de <i>E. coli</i> , em triplicata, para as águas estudadas na Etapa II.	113
APÊNDICE E – Análises de variabilidade de dados e de resíduos, considerando a probabilidade normal, de contagem de <i>E. coli</i> em função das densidades de corrente aplicadas, para as águas contaminadas com <i>E. coli</i> consideradas nesse trabalho.....	117

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

A produção de água potável em áreas onde há escassez desse recurso, assim como o crescente número de pessoas, é uma necessidade fundamental e por isso sugere à comunidade científica o estudo e aplicação de tecnologias alternativas para o tratamento da água que sejam viáveis e compatíveis ao meio ambiente. No processo de desinfecção, há a redução de microrganismos patogênicos e/ou substâncias indesejáveis à água, a um nível baixo o suficiente para garantir as condições de potabilidade, evitando-se a exposição dos indivíduos a riscos de saúde evitáveis (WHO, 2015).

Dentre os microrganismos amplamente conhecidos como indicadores da qualidade bacteriológica da água, o gênero *Escherichia coli*, que pertence à família *Enterobacteriaceae*, comumente encontrada no trato intestinal de organismos de sangue quente, é um dos principais analisados nos estudos de desinfecção da água. É importante salientar que a desinfecção de *E. coli* não implica a eliminação de outros tipos de microrganismos que estejam presentes no mesmo meio. Alguns estudos mostraram a maior vulnerabilidade da *E. coli* em relação a outros gêneros de bactérias em termos de desinfecção (Nakajima et al., 2004; Delaed et al., 2008; Bergmann et al., 2008).

No Brasil, os padrões de potabilidade da água para o consumo humano são regidos pela Portaria Nº 2914/2011, do Ministério da Saúde, e as metodologias analíticas para determinação dos parâmetros previstos na mesma são fundamentados nas normas nacionais ou internacionais mais recentes (BRASIL, 2011).

A cloração representa o método convencional de desinfecção, que, apesar do baixo custo e alta eficácia, possui as desvantagens de acúmulo de Cl_2 e formação de subprodutos derivados do cloro perigosos à saúde (Rosario-Ortiz et al., 2016). Pesquisas destacam outros métodos que vem sendo estudados, sendo esses fundamentados na utilização de compostos desinfetantes: monocloramina, dióxido de cloro, ozônio, peróxido de hidrogênio, bem como os tratamentos por irradiação UV e eletrólise (Cho et al., 2010; Li et al., 2011; Mao et al., 2018).

Em se tratando da desinfecção eletroquímica da água, estudos são cada vez mais aprofundados no sentido de identificar os efeitos dos agentes gerados na eletrólise sobre os microrganismos. Os efeitos químicos decorrentes da produção de cloro ativo, nas formas de cloro dissolvido, ácido hipocloroso e íon hipoclorito, através da eletrólise apresentam grande influência no processo de inativação dos microrganismos (Ghernaout, Naceur, & Aouabed, 2011). Nos sistemas eletroquímicos que geram espécies de cloro ativo em excesso, há o mesmo problema de geração de subprodutos que apresentam risco potencial à saúde dos indivíduos, inerentes ao processo de desinfecção convencional (cloração) da água (Kerwick et al., 2005; Bergmann et al., 2008).

A água potável é desinfetada principalmente com uma célula eletroquímica que reage com o conteúdo natural de íons cloreto para a formação de cloro ativo. A eletrolisação da água potável corroboram para a desinfecção por meio dos chamados oxidantes mistos, que através de solução salina geram uma mistura de oxidantes fortes: cloro livre, dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio, ozônio e outros radicais de vida curta (Palacios, Pampillón, & Rodríguez, 2000). Na eletrólise direta, os poluentes são oxidados após a adsorção na superfície do ânodo, sem o envolvimento de outras substâncias além do elétron, que é um “reagente limpo” (Panizza, 2010). Na oxidação indireta, os poluentes orgânicos não trocam elétrons diretamente com a superfície do ânodo, e sim por intermédio de espécies eletroativas regeneradas no mesmo, que agem como uma espécie de ponte para o transporte de elétrons entre o eletrodo e a matéria orgânica (Panizza, 2010).

A eficácia da desinfecção usando sistemas eletroquímicos é em grande parte relacionada às configurações dos mesmos. Dessa forma, a composição do eletrólito, dos materiais dos eletrodos, os microrganismos envolvidos nos testes, além de parâmetros operacionais como tempo de residência e densidade de corrente, são importantes na análise de eficiência do método. A presença de cloreto no eletrólito aumenta a eficácia de inativação das células, gerando espécies de cloro ativo desinfetantes, enquanto que H_2PO_4 , HCO_3^- e CO_3^{2-} têm efeito inibitório sobre a inativação dos microrganismos (Christensen et al., 2003; Diao et al., 2004).

Este trabalho diz respeito a análise da influência da densidade de corrente e do tempo de residência, aplicados a um reator eletrolítico composto por eletrodos de esponja de níquel (ânodo) e fibra de Carbono (cátodo), sob os parâmetros físico-químicos e níveis de desinfecção de *Escherichia coli* adicionadas às águas: de

abastecimento da rede LABDES, deionizada e solução de NaCl, bem como água de abastecimento público da cidade de Campina Grande, em diferentes níveis de concentração de bactérias.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo geral do presente trabalho foi o desenvolvimento e avaliação de um reator eletrolítico para desinfecção de águas, utilizando a bactéria *Escherichia coli* como indicador.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Projetar e construir protótipo de reator eletrolítico, que opere de forma contínua, com vazão medida através de um rotâmetro;
- Caracterizar o reator com diferentes tipos de águas com presença e ausência de *Escherichia coli*, em função da diferença de potencial aplicada sob diferentes vazões;
- Estudar efeito do aumento da diferença de potencial elétrico em função do tempo de residência do reator eletrolítico e a desinfecção de *Escherichia coli*;
- Avaliar as imagens das microscopias eletrônicas de varredura dos eletrodos de esponja de níquel e de fibra de carbono antes e após os tratamentos eletrolíticos no reator;
- Estudar os níveis de degradação do eletrodo de esponja de níquel através do controle da concentração de níquel presente no efluente;
- Analisar a aleatoriedade estatística entre as variáveis resposta densidade de corrente e o número de colônias de *Escherichia coli* ao final dos tratamentos no reator para a água deionizada, solução de NaCl e águas de abastecimento público local, referentes à Etapa II da pesquisa.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desinfecção da água

O processo de desinfecção da água é essencial à garantia de distribuição de água potável para o consumo humano. Nesse sentido, tecnologias em diferentes linhas de pesquisa vem sendo estudadas como forma de otimizar os processos de desinfecção e gerar menos subprodutos ao meio ambiente (Xi et al., 2017; Song et al., 2018; Rahman et al., 2018).

O tratamento convencional de água envolve, basicamente, as etapas de coagulação e floculação, sedimentação, filtração, adsorção e desinfecção. Essas etapas são processos físico-químicos auxiliam na remoção de turbidez, matéria orgânica e agentes patogênicos da água (Garfí et al., 2016). No processo de desinfecção da água, o cloro é o agente mais utilizado devido o seu custo ser relativamente baixo e sua alta eficácia, por ser um oxidante que reage com uma ampla gama de materiais nos sistemas de distribuição. Dessa forma, essas reações são responsáveis pela geração de subprodutos carcinogenicos, denominados *Potential carcinogenic disinfection byproducts* (DBPs). Os trihalometanos halogenados (THM's) e os ácidos haloacéticos (HAAs) são as classes principais de subprodutos de desinfecção (Gopa et al., 2007; Li et al., 2017).

Tecnologias para desinfecção de água contaminada com microrganismos, no âmbito da eletrólise, são estudadas sob diversas condições de operação. Um exemplo interessante é o desenvolvimento de um reator composto por eletrodos nanoestruturados em multiescala, para desinfecção de água contaminada com *Escherichia coli*, através da aplicação de grandes intensidades de campo elétrico no dispositivo condutor (Schoen et al., 2010).

Bruguera-Casamada et al., (2016) estudaram o poder de desinfecção do mecanismo de oxidação eletrolítica (EO) em uma célula eletrolítica composta por um tanque cilíndrico de vidro, a qual foram dispostos os eletrodos de filme de diamante dopado com Boro (BDD), como ânodo, e uma chapa de aço inoxidável como cátodo,

aplicando densidade de corrente constante sob intensa agitação, para que as bactérias e os resíduos citoplasmáticos fossem levados à superfície do ânodo.

2.2 Padrões de potabilidade da água

No Brasil, a potabilidade da água é regida pela Portaria N° 2914, de 2011, do Ministério da Saúde. As metodologias analíticas para determinação dos parâmetros previstos nesta Portaria devem estar de acordo com as normas nacionais ou internacionais mais recentes, tais como:

1 - *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, com origem nas instituições; American Public Health Association (APHA); American Water Works Association (AWWA) e Water Environment Federation (WEF);

2 - *United States Environmental Protection Agency* (USEPA);

3 - Normas publicadas pela International Standardization Organization (ISO);
e IV - Metodologias propostas pela Organização Mundial à Saúde (OMS).

Em relação aos padrões microbiológicos de potabilidade da água, tem-se a Tabela 2.1 a seguir:

Tabela 2.1. Padrão microbiológico da água para consumo humano

Tipo de água		Parâmetro		VMP ⁽¹⁾
Água para consumo humano		<i>Escherichia coli</i> ⁽²⁾		Ausência em 100 mL
Água tratada	Na saída do tratamento	Coliformes totais ⁽³⁾		Ausência em 100 mL
	No sistema de distribuição (reservatórios e rede)	<i>Escherichia coli</i>		Ausência em 100 mL
		Coliformes totais ⁽⁴⁾	Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem < 20.000 habitantes	Apenas uma amostra, entre as amostras examinadas no mês, poderá apresentar resultado positivo
			Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem ≥ 20.000 habitantes	Ausência em 100 mL em 95% das amostras examinadas no mês

Legenda: (1) Valor máximo permissível; (2) Indicador de contaminação fecal; (3) Indicador de eficiência de tratamento; (4) Indicador de integridade do sistema de distribuição (reservatório e rede). **Fonte:** Ministério da Saúde (2015).

Os parâmetros organolépticos são de extrema importância na avaliação da potabilidade da água, já que imprimem, características físicas, químicas e sensoriais da mesma. A Tabela 2.2 apresenta esses parâmetros.

Tabela 2.2. Parâmetros organolépticos de potabilidade da água

Parâmetro	Unidade	VMP⁽¹⁾
Alumínio	mg.L ⁻¹	0,2
Amônia (com NH ₃)	mg.L ⁻¹	1,5
Cloreto	mg.L ⁻¹	250
Cor aparente ⁽²⁾	uH	15
1,2 diclorobenzeno	mg.L ⁻¹	0,01
1,4 diclorobenzeno	mg.L ⁻¹	0,03
Dureza total	mg.L ⁻¹	500
Etilbenzeno	mg.L ⁻¹	0,2
Ferro	mg.L ⁻¹	0,3
Gosto e odor ⁽³⁾	Intensidade	6,0
Manganês	mg.L ⁻¹	0,1
Monoclorobenzeno	mg.L ⁻¹	0,12
Sódio	mg.L ⁻¹	200
Sólidos dissolvidos totais	mg.L ⁻¹	1000
Sulfato	mg.L ⁻¹	250
Sulfeto de hidrogênio	mg.L ⁻¹	0,1
Surfactantes (como LAS)	mg.L ⁻¹	0,5
Tolueno	mg.L ⁻¹	0,17
Turbidez ⁽⁴⁾	NTU	5,0
Zinco	mg.L ⁻¹	5,0
Xilenos	mg.L ⁻¹	0,3

Legenda: (1) Valor máximo permissível; (2) Unidade Hazen (mgPt–Co.L⁻¹); (3) Intensidade máxima de percepção para qualquer característica de gosto e odor com exceção do cloro livre, nesse caso por ser uma característica desejável em água tratada; (4) Unidade de turbidez. **Fonte:** Ministério da saúde (2015).

2.3 Contaminação de água potável por microrganismos

A segurança da água potável é fundamental para a saúde humana. De acordo com os levantamentos da OMS, 1,8 bilhão de pessoas não têm acesso a água adequada para o consumo humano em todo o mundo (OMS, 2015). A exposição dos indivíduos a água potável com baixa qualidade pode resultar em uma variedade de doenças transmitidas pela água, como diarreia, cólera, disenteria, febre tifoide e poliomielite (He et al., 2018).

A qualidade da água potável está em grande parte relacionada às condições dos parâmetros microbiológicos aos quais se encontra. Esses parâmetros são determinados, principalmente, através de organismos indicadores de contaminação fecal na água. A disponibilidade de organismos indicadores é muitas vezes a resposta na avaliação dos possíveis riscos essa água pode causar à saúde, de acordo com os regulamentos e diretrizes que tratam da potabilidade no mundo (Dunling & Wanda, 2008; Khan et al., 2017).

Em se tratando do processo de desinfecção da água bruta captada pelas estações de tratamento, até que essa saia em condições de potabilidade e chegue aos consumidores, há um período de residência na rede de distribuição que pode variar de horas a dias. Bactérias, fungos e leveduras são sistematicamente encontrados nos sistemas, e são considerados como reatores bioquímicos que interagem com a água a ser distribuída (Lautenschlager et al., 2013).

A água potável pode tornar-se contaminada ao entrar em contato com microrganismos presentes no solo, que podem chegar até o fluxo de água através de fissuras nas tubulações, e também, conforme observado por (Ikonen et al., 2017), pode ocorrer a contaminação microbiana acidental através de conexões cruzadas de fontes de água potável com tubulações de esgoto. Dessa forma, a qualidade microbiana dessa água que abastece os reservatórios das residências pode ser prejudicada, apresentando riscos potencialmente sérios para a saúde dos humanos (Heibati et al., 2017).

2.4 Mecanismo de desinfecção eletroquímica de águas contaminadas com microrganismos

Diferentes métodos de desinfecção de água potável competem uns com os outros atualmente. Além da cloração ou tratamento por componentes de cloro, amplamente utilizados, a desinfecção pode ser realizada através da ozonização ou irradiação UV. Sendo que esse último método ainda requer um processo de cloração final para excluir a rebota de microrganismos. Avaliações recentes mostram que a tendência é utilizar menos cloro, evitando os problemas causados pelo excesso de cloração, dentre os principais: odor, formação de subprodutos, transporte e riscos de armazenamento (Bergmann et al., 2002). Em contrapartida, a adaptação de sistemas

convencionais de desinfecção a plantas menores e descentralizadas muitas vezes é difícil devido às restrições financeiras ou barreiras tecnológicas (Schmalz et al., 2009).

A tecnologia de desinfecção eletroquímica vem sendo considerada como uma alternativa viável para o tratamento de diversas matrizes de água, devido a sua capacidade de desinfecção de um amplo espectro de microrganismos patogênicos. Além disso, os agentes desinfetantes gerados podem ser ambientalmente saudáveis, assim como o consumo de energia pode ser reduzido, podendo também ter seu potencial gerado por energia solar, e facilidade de operação também são fatores importantes para sua utilização.

A desinfecção eletroquímica de microrganismos presentes em águas residuais de origem natural ou contaminadas artificialmente, é decorrente da ação de uma variedade de oxidantes produzidos durante o processo de eletrólise da água. Os íons de cloro presentes na água geram espécies reativas de cloro livre e radicais do mesmo (Cl_2 , HOCl, ClO^- , *Cl e $^*Cl_2^-$), os quais são considerados os desinfetantes primários na eletrólise da água. Além disso, espécies reativas de oxigênio (*OH , H_2O_2 , O_3 e $^*O_2^-$), também geradas durante a eletrólise, melhoram a eficiência da desinfecção (Huang et al., 2016). Esse mecanismo de desinfecção baseado em condições operacionais simples é denominado de oxidação eletroquímica (EO), o qual é caracterizado pela compatibilidade ambiental devido à produção *in situ* de radical hidroxílico (*OH) a partir da descarga de água na superfície do ânodo, sem necessidade de adição de produtos químicos nocivos (Bruguera-casamada et al., 2016).

Chen et al., (2016) descreveram que, durante a eletrólise, inicialmente os íons cloreto (Cl^-) são oxidadas ao cloro (Cl_2) no anodo, de acordo com a Reação (1) a seguir:



Em seguida, dois tipos de desinfetantes ativos, o ácido hipocloroso (HOCl) e o íon hipoclorito (OCl^-), são produzidos pelo gás de cloro, que se dissolve em água de acordo com as Reações (2) e (3)

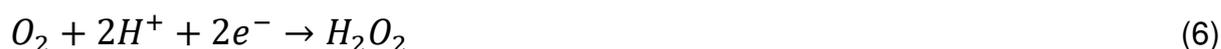




Ainda no ânodo, radicais hidroxila (*OH) podem ser gerados conforme a reação ionização da água, de acordo com a Reação (4).



Paralelamente a essas reações, o peróxido de hidrogênio pode ser reduzido através da produção crescente de oxigênio no ânodo pelo processo eletroquímico apresentado nas Reações (5) e (6).



Pequenas quantidades de ozônio também podem ser produzidas através da oxidação de moléculas de água no ânodo, conforme a Reação (7).

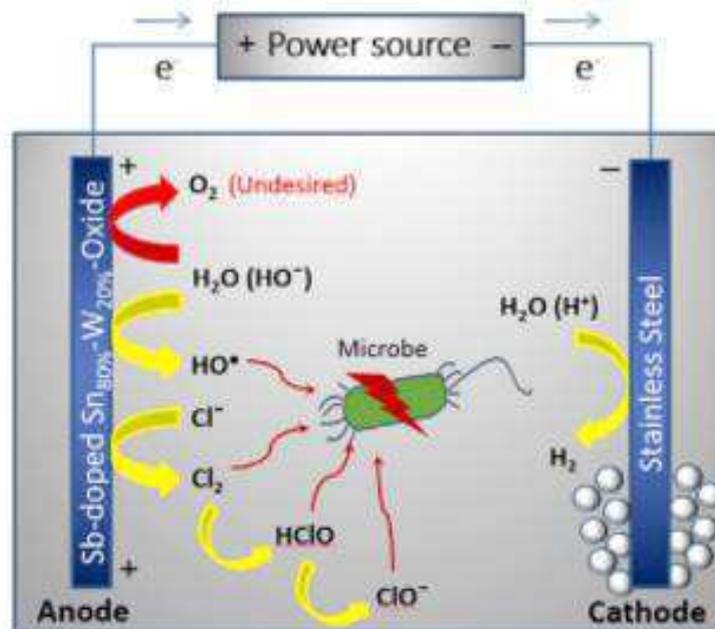


As espécies HOCl, OCl-, OH, H₂O₂ e O₃ são agentes capazes de inativar microrganismos. Finalmente, a eletrosorção das cargas negativas das células dos microrganismos para a superfície do anodo seguido por uma reação de transferência direta de elétrons pode matar esses microrganismos (Deborde & Von Gunten, 2008). Devido à complexidade do processo de desinfecção, é difícil identificar o desinfetante que desempenha o papel mais importante e também o mecanismo exato. De acordo com a literatura (Jeong et al., 2009; Hao et al., 2012; Liang et al., 2005), o principal mecanismo de desinfecção envolveria radicais hidroxilo e cloro eletronicado.

Ghasemian et al., (2017) desenvolveram um sistema de desinfecção eletroquímica de fontes de água potável, suprimentos industriais de água bruta, alimentos líquidos e efluentes de águas residuais, contendo bactérias, dentre elas a *Escherichia coli*. A partir de anodo de óxido de Sn80% -W20% dopado com Sb, o

mecanismo de desinfecção dessas águas com íons e sais presentes é apresentado na Figura 2.1.

Figura 2.1. Esquemática do mecanismo de desinfecção de microrganismos



Fonte: Ghasemian et al., (2017)

2.5 Fatores que influenciam no processo de desinfecção eletroquímica

A desinfecção eletroquímica apresenta eficiência no tratamento de diferentes tipos de águas contaminadas. O mecanismo pode ser aplicado a inúmeros poluentes de natureza orgânica e inorgânica. Entretanto, é necessário avaliar as condições operacionais adequadas e o estudo dos fatores que podem influenciar no desempenho desses sistemas em geral, no intuito de relacionar as melhores condições de trabalho para cada tipo de água a ser tratada (Moussa et al., 2017). Os parâmetros mais relevantes no desempenho da eletrólise, considerando a capacidade do mecanismo na remoção de poluentes de águas residuais são discutidos como segue.

2.5.1 Eletrodos utilizados

Durante o processo de desinfecção eletroquímica, o eletrodo escolhido é um dos cernes em termos de eficiência da desinfecção. A seleção do material do eletrodo é baseada em um equilíbrio dedicado entre os desejos de resistência à corrosão, alta condutividade, alto efeito catalítico e baixo preço. O aço inoxidável é um material de eletrodo barato com baixo potencial de sobreposição, porém o aço não tem resistência à soluções alcalinas de alta concentração. Outros materiais, como o chumbo e os metais nobres, não resistem bem a eletrólitos alcalinos, além do custo elevado. O níquel foi identificado como um material muito ativo e com boa resistência à corrosão. Tornou-se popular nos processos de eletrólise de água, exibindo atividade de geração de hidrogênio razoavelmente alta (Zeng & Zhang, 2010).

Em relação à desinfecção eletroquímica da água potável em células de fluxo, Bergmann et al., (2009) enfatizaram a utilização de ânodos de diamante dopado com Boro (BDD), os quais possuem excelentes propriedades, dentre elas a estabilidade química e poder de oxidação, devido à sua capacidade de produzir espécies altamente oxidantes (radicais OH, O₃, H₂O₂). O BDD é considerado um “incinerador” eletroquímico de substâncias orgânicas e resíduos, as quais podem ser convertidas em CO₂. Liu et. al., (2012) destacaram as propriedades semicondutoras do BDD, possuindo ampla aplicação na eletroquímica e alta resistência à corrosão, sendo apropriado na desinfecção de águas residuais.

No tratamento de água contaminada por culturas puras de *Escherichia coli* (ATCC 700891), Vukusic et al., (2016) realizaram um estudo comparativo entre um reator eletrolítico com eletrodos de Ni-Cr e outro com eletrodos de Prata. O eletrodo de prata desempenhou o papel mais importante em termos de desinfecção das bactérias, com a redução de 6,5 log de E. coli da água em um tempo de 60 s, enquanto que a liga Ni-Cr reduziu menos de 1 log dessas bactérias no mesmo tempo de tratamento. Esse desempenho superior do eletrodo é devido à penetração de nanopartículas de prata, liberadas pelo processo oxidativo dos eletrodos, nas células das bactérias, atingindo a replicação do DNA das mesmas, o que inativa as proteínas celulares.

O nitreto de titânio (TiN) é um material biocompatível e possui uma resistência elétrica muito baixa. O controle eletroquímico de microrganismos patogênicos derivados de um sistema de distribuição de água potável foi investigado por

Matsunaga, et al., (2000), que comparou a utilização do potencial de 1,2V para o eletrodo TiN versus Calomel saturado (SCE). A relação de sobrevivência de microrganismos diminuiu para abaixo de 40%. As alterações no pH não foram observadas em 1,2 V versus SCE. Além disso, aplicando -0,6 V durante 30 min, 69% das células na superfície do ânodo foram removidas pela repulsão eletrostática. Por conseguinte, foi construído um reator de desinfecção eletroquímica utilizando uma rede TiN como eletrodo de trabalho. A água potável contendo concentração celular em torno de 70 UFC.mL⁻¹, foi passada continuamente através do reator a uma taxa de fluxo de 15 mL.min⁻¹. A concentração celular viável na água tratada diminuiu para abaixo de 5 UFC.mL⁻¹. Quando não foi aplicado potencial, a concentração de células na água tratada aumentou gradualmente após 200 h de operação do reator. Em contraste, quando os potenciais alternados de 1,2 e -0,6 V versus prata / cloreto de prata (Ag / AgCl) foram aplicados ao eletrodo TiN, a concentração celular viável permaneceu abaixo de 100 UFC.mL⁻¹ durante 440 h de operação.

2.5.2 Distância entre eletrodos

A distância entre os eletrodos está fortemente relacionada à resistência elétrica dos mesmos, que é a sua oposição à passagem de corrente elétrica nesses materiais. Dessa forma, a resistência elétrica é expressa pela Equação (1) a seguir:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

Onde,

ρ = é a resistividade intrínseca do eletrodo (Ωm), também relacionada à oposição de corrente elétrica ao atravessarem de um ponto a outro do eletrodo, mas trata-se de uma grandeza independente da dimensão do mesmo;

A = área da seção transversal do eletrodo (m^2);

l = é o comprimento (m) do caminho os quais os elétrons vão percorrer com a aplicação da diferença de potencial.

A Equação (1) mostra que, ao reduzir o espaço entre os eletrodos, pode ser obtida menor resistência elétrica. No entanto, é preciso se questionar sobre o quanto é possível de redução de distância para que o sistema opere nas condições mais ideais possíveis (Mazloomi & Sulaiman, 2012).

Nagai et al., (2003) encontraram um espaço ideal entre os eletrodos da liga Ni-Cr-Fe. O estudo foi fundamentado com base na análise dos efeitos de fraturas vazias entre os eletrodos, causadas pela existência de bolhas de gás produzidas no processo de eletrólise. Então, a partir da célula de eletrólise submetida à pressão atmosférica com eletrodos, mostrou-se que uma redução excessiva de espaço entre os eletrodos, acarretou em aumento das fraturas vazias, diminuindo a eficiência do processo, que se torna mais sensível no caso de densidades de corrente maiores. Essa diminuição de eficiência também foi observada muito antes por LeRoy et al., (1979), que apontaram que o aumento do volume de gás entre os eletrodos leva a maior resistência elétrica, conseqüentemente reduzindo a eficiência da eletrólise da água.

Vukusic et al., (2016) analisaram em seus experimentos, utilizando plasmas de descarga elétrica com eletrodos de prata, que a força do campo elétrico para a descarga de polaridade negativa foi aumentada com a diminuição da distância entre os eletrodos. Dessa forma, a força do campo elétrico seria inversamente proporcional ao espaçamento entre os eletrodos e diretamente proporcional à tensão elétrica aplicada.

2.5.3 Fonte de alimentação de corrente elétrica

A fonte de alimentação de corrente contínua (CC) é a de maior aplicabilidade nas células eletrolíticas para processos de eletrocoagulação. Todavia, o uso dessa corrente acarreta na oxidação, a qual leva ao consumo do anodo e à formação de uma camada de óxido no catodo, que é a passivação. O efeito da passivação causa aumento no potencial passivo, levando a um maior consumo de energia. O fluxo de corrente pode ser diminuído entre anodo e catodo, diminuindo também a eficiência do sistema.

As limitações no uso da corrente contínua podem ser minimizadas pela adição de eletrodos de sacrifício em paralelo na configuração da célula eletrolítica.

Além disso, para se reduzir o efeito de passivação do catodo e aumentar a vida útil do eletrodo, pode-se inverter, manualmente, o sentido da corrente em intervalos regulares de tempo. Assim, o catodo torna-se anodo e vice-versa (Cerqueira et al., (2011)).

2.5.4 Densidade de corrente elétrica

A densidade de corrente é definida pela Equação (2)

$$\vec{J} = \frac{I}{A} \quad (2)$$

Onde,

I = corrente elétrica (A)

A = área do eletrodo (cm²)

O parâmetro determina a quantidade de íons metálicos que são liberados pelos eletrodos conforme a corrente elétrica é aplicada. A corrente elétrica, quando é usada em grandes valores, gera desperdício de energia elétrica, já que ocorre o aquecimento do meio aquoso, e conseqüentemente desperdício de energia elétrica. Dessa forma, a eficiência de desinfecção da água também diminui, considerando que existe um valor crítico de densidade de corrente a ser aplicado nos sistemas eletrolíticos.

Schaefer et al., (2015), que utilizaram célula eletroquímica composta por anodo de Ti/IrO₂, mostram que a taxa de desinfecção estava relacionada à corrente elétrica aplicada, que é parte da caracterização da densidade de corrente. Em determinados momentos dos ensaios experimentais, onde a densidade de corrente mais baixa foi observada, esse fato atribuiu-se ao consumo de desinfetantes, como as espécies de cloro ativo, por outras espécies oxidáveis presentes na água. A pesquisa ainda mostrou que a desinfecção seria uma função da carga específica (Q), que é a carga passada por unidade de volume de água.

Ghasemian et al., (2017) desenvolveram um sistema altamente eficaz na inativação bacteriana para uma solução de NaCl 0,1 M contaminada com ~ 10⁷ UFC.mL⁻¹ de *Escherichia coli* D21. Com a aplicação de uma densidade de corrente de

6,0 mA.cm⁻², foi alcançada a taxa de desinfecção de 100% de bactérias para um tempo de contato inferior a 60 s.

2.5.5 Concentração de íons

Os íons presentes no meio aquoso, influenciam basicamente na desestabilização dos íons metálicos dos eletrodos. Os íons sulfato (SO₄²⁻) apresentam a propriedade de inibição da corrosão metálica dos eletrodos, diminuindo a desestabilização dos coloides e a eficiência de corrente elétrica. Em contrapartida, íons cloreto (Cl⁻) e nitrato (NO₃⁻) impedem que haja inibição dos íons sulfato, com a quebra de camada do efeito de passivação. A precipitação de sais nos eletrodos é um efeito adverso dos íons SO₄²⁻, e os íons Cl⁻ auxilia na redução desse fator, evitando a formação de uma camada isolante nos eletrodos e consequentemente a diminuição da eficiência de corrente elétrica (Khandegar & Saroha, 2013).

Rajab et al., (2015) investigaram a capacidade de usar um eletrodo de diamante dopado com boro (BDD) para desinfecção bacteriana em água contendo quantidades variáveis de cloreto. A água de alimentação contendo *Pseudomonas aeruginosa* foi tratada eletroquimicamente e a eficiência da desinfecção foi conduzida pela geração de cloro livre em função da concentração de Cl⁻ na água. Um efeito sinérgico da geração de cloro livre e ozônio in situ durante o processo de desinfecção resultou em um impacto bactericida efetivo. No caso de água sintética com uma baixa concentração de cloreto (20 mg L⁻¹) e uma densidade de corrente aplicada de 167 mA.cm⁻², uma inativação de 6 log de *Pseudomonas aeruginosa* poderia ser alcançada após 5 minutos de exposição.

A condutividade da solução é um fator importante que afeta diretamente a eficiência e consumo de energia da célula eletrolítica. Dessa forma, quanto maior a condutividade, menor o consumo de energia e mais eficiente é a remoção de poluentes. Estudos realizados por Vukusic et. al., (2016) concluíram que em soluções de condutividade elétrica inferior a 200 μS.cm⁻¹, o mecanismo de inativação mais significativo é a eletroporação, baseada em descargas elétricas pulsadas, induzida por campo elétrico.

Gomez-López, Gil & Allende (2017) avaliaram a eficácia de células eletrolíticas recentemente desenvolvidas capazes de gerar maior concentração de espécies reativas de oxigênio usando menor poder e concentração de sal do que

células convencionais. Os resultados indicaram que o sistema de eletrólise combinado com a adição mínima de NaCl (0,05%) foi capaz de suprimir a acumulação de *E. coli*.

2.5.6 Efeito do parâmetro pH

Li et al., (2010) observaram que em soluções contaminadas com nitrato, as tendências para a redução eletroquímica desse componente foram similares em diferentes pHs iniciais. Sendo assim, partindo-se dos pHs iniciais de 3,0, 5,0, 7,0, 9,0 e 11,0, estes aumentaram para 11,2 e 11,3 em 3 horas de reação eletrolítica. Essa variação se deve, principalmente, às reações que formam íons hidroxila e nitrogênio durante a redução eletroquímica de nitrato. Os incrementos no valor final do pH sugerem que a produção de íons H^+ não corresponde à produção dos íons OH^- . É bem conhecido que uma diminuição no pH da solução promove a formação de hidrogênio. A um pH mais baixo, além da redução de nitratos, uma reação de evolução de hidrogênio competitiva mais forte ocorreria na superfície do eletrodo. A taxa de redução de nitrato aumentou ligeiramente como o pH inicial tornou-se mais alcalino, o que verifica que a evolução do hidrogênio tem uma influência negativa na redução de nitratos. Nesse sentido, pode-se dizer que o método eletroquímico tem um desempenho satisfatório no intervalo de pH inicial de 3,0 a 11,0 adotados nesse estudo de remoção de nitrato.

Ling, Xu, & Chen, (2015) investigaram a variação de pH de um eletrólito, composto por matéria orgânica, tratado em um reator eletroquímico multicelular, sendo o anodo de PbO_2/Ti e o catodo de aço inoxidável. O pH diminuiu gradativamente de um valor inicial de 7,05 para 4,70, e 4,13 nas segunda e quarta células, alcançando o valor de 3,74 na sexta célula. Depois disso, o pH voltou a aumentar para 5,37 e 6,21 nas oitava e décima células, respectivamente. O decréscimo no valor do pH foi atribuído à formação de ácidos orgânicos, assim como reações secundárias provenientes da redução da água e a evolução do oxigênio.

2.6 Campo elétrico no processo de desinfecção

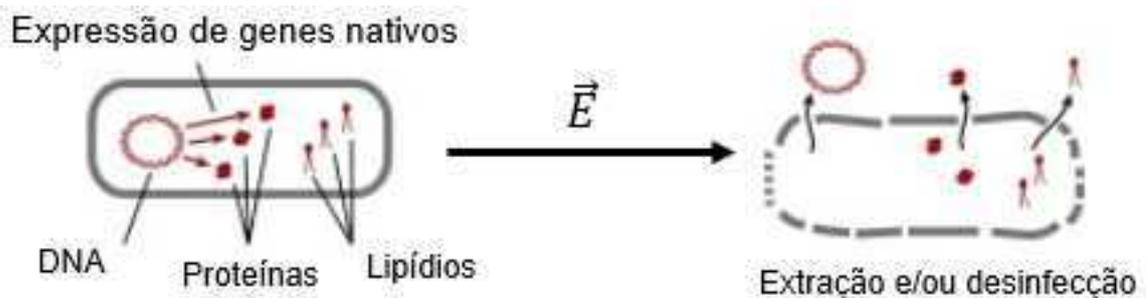
O campo elétrico gerado nos sistemas eletrolíticos para desinfecção de águas, é associado ao potencial elétrico. Esses possuem relação de proporcionalidade, então, quanto maior o potencial, maior será o campo elétrico

produzido pelo sistema. A crescente ação do campo elétrico produz micro poros na membrana celular bacteriana, o que pode, por sua vez, alterar a permeabilidade da mesma, possivelmente causando a morte celular bacteriana. Micro poros combinados com espécies reativas de oxigênio também geradas na eletrólise, representam um melhor resultado em termos de desinfecção de águas (Singh et al., 2016).

Schoen et al., (2010) destacaram o mecanismo da eletroporação no processo de desinfecção de bactérias presentes na água, que consiste na aplicação de campo elétrico na mesma, de modo que o potencial elétrico tenha efeito degradativo sobre as membranas celulares dessas bactérias. A eletroporação também pode ser denominada como um fenômeno que possibilita a entrada de moléculas nas células, bem como a saída de componentes intracelulares, através do aumento da permeabilidade à membrana plasmática das mesmas, como consequência de sua exposição a um campo elétrico pulsado de amplitude suficiente (Yarmush et al., 2014; Napotnik & Miklavčič, 2018).

A aplicação da eletroporação através da aplicação de campo elétrico de forma pulsada, vem sendo estudada desde a década de 1960 nos processos de desinfecção de águas contaminadas com microrganismos nocivos à saúde humana. Na desinfecção por eletroporação, os microrganismos são expostos a pulsos de campo elétrico fortes e longos o suficiente para inibir sua atividade, incluindo sua divisão, crescimento e síntese de substâncias patogênicas (Kotnik et al., 2015). A Figura 2.2 mostra a ação do campo elétrico pulsado sobre uma célula de microrganismo, com a extração de componentes da mesma ou desinfecção através do aumento de permeabilidade à membrana celular.

Figura 2.2. Efeito do campo elétrico pulsado sobre a célula de um microrganismo



Fonte: Adaptado de Kotnik et al., (2015)

2.7 Efeito da eletrólise em água de abastecimento público contaminada com microrganismos

Delaed et al., (2008) destacam alguns dos principais métodos de desinfecção dos sistemas de água de abastecimento mais utilizados, como o superaquecimento e descarga, cobre / ionização de prata, luz ultravioleta, aquecimento instantâneo e a cloração, sendo esse último o mais utilizado (Kerwick et. al., 2005).

Os sistemas de desinfecção eletroquímica da água surgem como alternativa relativamente nova (Kraft et al., 1999a, b). O mecanismo é baseado em uma corrente de baixa tensão que passa através de eletrodos e é conduzida à água, causando a formação de agentes oxidantes, como cloro livre, dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio e ozônio (Venczel et al., 1997). Como a água de abastecimento contém baixa concentração de cloreto, a eletrólise permite a geração cloro livre, que se unem aos íons de cloro presentes, tornando possível a desinfecção da mesma (Nakajima et al., 2004). A capacidade de desinfecção pode ser mantida por um tempo na água, através da transmissão de energia reativa dos agentes oxidantes. O mecanismo de desinfecção através do cloro livre consiste na destruição da membrana celular externa da bactéria, posteriormente o contato do mesmo com o citoplasma celular e, finalmente, a degeneração das proteínas presentes (Kiura et al., 2002; Nakajima et al., 2004).

Nakajima et al., (2004), citado anteriormente, realizaram o estudo do potencial de desinfecção da eletrólise e a forma como se dá esse mecanismo nesse tipo de água contaminada com bactérias. A pesquisa mostrou que águas de abastecimento artificialmente contaminadas com *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Legionella pneumophila* e *Staphylococcus aureus* foram esterilizadas por eletrólise na faixa de corrente elétrica contínua (CC) de 20-30 mA em um tempo de contato de 5 minutos. A bactéria *P. aeruginosa* apresentou modificações morfológicas após a eletrólise, com formação de bolhas na parede celular e agregação irregular de pequenos grânulos citoplasmáticos. Além disso, a enzima citoplasmática, nitrato redutase, foi inativada. Por outro lado, o DNA genômico da bactéria eletrólise não foi degenerado, mantendo-se parte de sua atividade de DNA polimerase. Sendo assim, observou-se que o cloro residual livre foi o principal agente desinfectante das bactérias durante a eletrólise, e o mecanismo mais provável de desinfecção foi a destruição das

membranas dessas bactérias, seguido pela agregação de proteínas citoplasmáticas periféricas.

2.8 Fatores limitantes na eficiência da eletrólise da água

A eficiência das células eletrolíticas nos sistemas de desinfecção de águas representa um importante elemento de estudo, tendo em vista a necessidade de se obter processos que garantam, cada vez mais, maior capacidade de operação desses equipamentos.

Dentre os problemas mais frequentes que interferem no processo de eletrólise, destaca-se a incrustação. Liu et al., (2002) destacaram a ocorrência de incrustações resultantes da mistura de microrganismos e outros minerais existentes nos sistemas de água no decorrer do seu fluxo através dos equipamentos e tubulações.

Huang et al., (2016) destacaram que sob potenciais elétricos elevados ou tempos de tratamento eletroquímico prolongados, a água pode apresentar em sua composição excessos de íons clorato (ClO_3^-), em condições alcalinas, além de outros agentes oxidantes altamente oxidados. Dessa forma, apesar dos níveis elevados de Cl_2 e oxidantes alcançados que favorecem a desinfecção de microrganismos, nessas condições o problema de toxicidade dessa água aparece como limitante para sua utilização em determinados fins.

Outro fator importante é a produção de microbolhas de gás H_2 na superfície do eletrodo. Se o seu tamanho for apropriado, essas começam a se afastar da superfície do eletrodo. Em contrapartida, se algumas das bolhas de gás eventualmente permanecerem na superfície do eletrodo, as reações de transferência de carga de partículas para a água podem diminuir, e conseqüentemente levam à redução da eficiência do processo de eletrólise (Abid et al., 2017).

2.9 *Escherichia coli*

A *Escherichia coli* é uma das bactérias patogênicas mais estudadas no mundo. Conforme destacaram Rompré et. al., (2002), o grupo ao qual a *E. coli* está inserida é denominado *Coliform*, que inclui uma ampla diversidade em termos de gênero e espécie, pertencentes ou não à família *Enterobacteriaceae*. Os coliformes

são essencialmente definidos pelas suas características bioquímicas. De acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, membros do grupo coliforme são descritos como:

1. aeróbicos e anaeróbicos facultativos, Gram-negativos, bactérias sem formação de esporos que fermentam lactose com gás e ácido Formação dentro de 48 h a 35 ° C (técnica de fermentação por tubos múltiplos);
2. aeróbicos e anaeróbicos facultativos, Gram-negativos, bactérias sem formação de esporos e em forma de haste, que desenvolvem uma colônia vermelha com um brilho metálico dentro de 24 h a 35º C (técnica de membrana filtrante).

O gênero *Escherichia*, que recebeu o nome do pediatra alemão Theodor Escherich, consiste em microrganismos caracterizados por bacilos anaeróbicos facultativos, e Gram-negativos que pertencem à família *Enterobacteriaceae*, como já foi mencionada sua existência dentro do grupo *Coliform*.

A espécie do gênero *Escherichia coli* é amplamente distribuída, onde é a principal espécie anaeróbio facultativo, habitando o intestino grosso de humanos e de animais de sangue quente. Embora a maioria das cepas de *E. coli* viva inofensivamente no cólon intestinal, e raramente causem doenças em indivíduos saudáveis, uma série de cepas patogênicas, como a O157: H7 e outras enterohemorrágicas podem se tornar agentes potenciais de problemas intestinais e doenças extraintestinais, tanto em indivíduos saudáveis como em pacientes imunocomprometidos. Nesse sentido, ainda é emergente e preocupante essas doenças transmitidas pela água (OMS, 2004; Gomes et al., 2016).

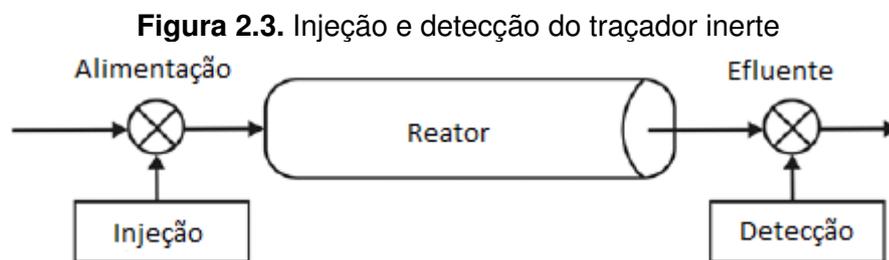
2.10 Estudo do tempo de residência em um reator

É evidente que elementos de fluido que seguem diferentes rotas em um sistema podem gastar tempos diferentes para passarem através do mesmo. A distribuição destes tempos para a corrente que deixa o sistema, é denominada de distribuição do tempo de residência (DTR), e essa distribuição depende da geometria e hidrodinâmica do fluxo no interior do sistema. Este parâmetro quantifica o tempo

total que o elemento do fluido permaneceu no sistema e é um parâmetro essencial na caracterização de sistemas sendo utilizado como um parâmetro para a avaliação de desempenho no tratamento de efluentes (Brandão, 2001).

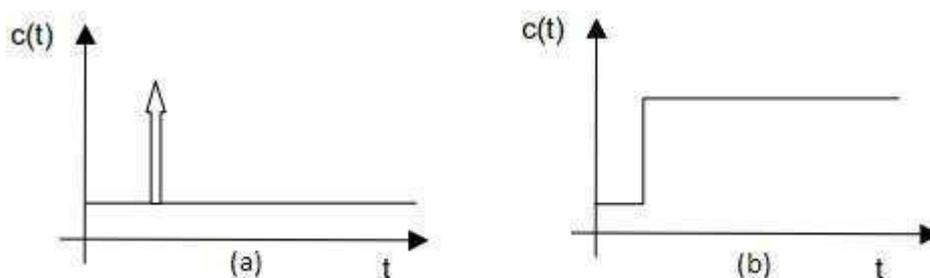
2.10.1 Medida da distribuição do tempo de residência (DTR)

A DTR é determinada injetando na entrada do reator, uma substância inerte, denominada de traçador, percorrendo esse a corrente efluente do reator, em função do tempo. O traçador trata-se de uma espécie não-reagente e facilmente detectável e deve apresentar propriedades físicas similares àquelas da mistura reagente e ser completamente solúvel nesta mistura. Os métodos de injeção mais utilizados são a *perturbação em pulso* e a *perturbação em degrau* (FOGLER, 1999). A Figura 2.3 indica onde é realizada a injeção do traçador, e seu ponto de detecção ao longo do reator, e a Figura 2.4 representa esquematicamente as perturbações em pulso e degrau, respectivamente.



Fonte: Adaptado de Fogler (1999)

Figura 2.4. Esquemas de injeções de perturbações em pulso (a) e em degrau (b)



Fonte: Sasaki (2015)

2.10.2 Traçadores

De acordo com Bedmar (1972), o traçador é qualquer produto que, incorporado em uma substância, permite investigar o comportamento desta em um determinado processo físico ou químico. Dessa forma, os traçadores têm a finalidade de marcação de fluidos, sendo em muitos casos uma ferramenta simples e de baixo custo para obtenção de modelos que representem o escoamento de um fluido em um determinado sistema. As principais propriedades de um traçador ideal são as seguintes:

- a) Ser uma espécie não reativa;
- b) facilmente detectável;
- c) completamente solúvel no sistema;
- d) Propriedades físicas semelhantes aquelas da mistura reagente;
- e) Não ser adsorvido nas paredes do reator ou em outras superfícies;
- f) Comportamento hidrodinâmico idêntico ao da substância que se pretende estudar;
- g) Possuir uma característica adicional que permita diferenciá-lo da substância que pretende estudar;
- h) O método de detecção e de medição do traçador deve ser fácil, de alta eficiência e passível de ser realizado através de equipamento simples e de baixo custo;
- i) O traçador deve ser conservativo, e não deve estar sujeito a perdas indesejáveis durante o trânsito entre o local de injeção e o de coleta, ou ainda, entre o local de coleta e o de medição.

2.10.3 Curva resposta à injeção de traçador do tipo pulso

Se à entrada do sistema for aplicada uma injeção tipo pulso, conforme é apresentado na Figura 2.4 (a), a resposta do sistema a este estímulo é denominada curva C.

Sabendo-se que o tempo médio de residência teórico é definido pela Equação (3):

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

Onde,

V = volume do sistema (L)

Q = vazão (L.min⁻¹)

A curva C então é adimensionalizada através da divisão entre as concentrações medidas na saída do sistema ao longo do tempo pela relação expressa na Equação (4).

$$c_0 = \frac{M}{V} \quad (4)$$

Onde,

M = massa total do traçador injetado (mg)

V = volume do sistema (L)

A Equação (4) pode ser escrita da seguinte forma:

$$c_0 = Q \int_0^{\infty} \frac{c(t)dt}{V} \quad (5)$$

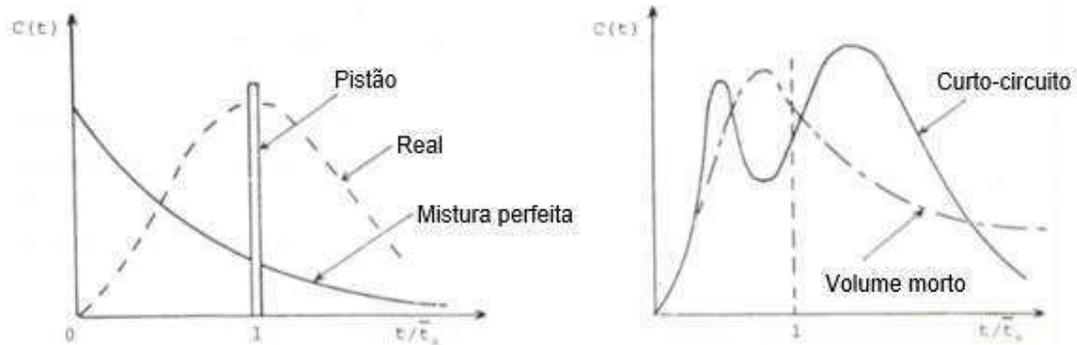
Substituindo a Equação (3) na Equação (5),

$$c_0 = \frac{\int_0^{\infty} c(t)dt}{\tau} \quad (6)$$

A normalização de $c(t)$, em relação às variáveis concentração e tempo, nada mais é que a curva da DTR $E(t)$, como será visto na seção seguinte.

A Figura 2.5 apresenta exemplos de curvas respostas a uma injeção tipo pulso.

Figura 2.5. Diferentes comportamentos de curvas respostas para a injeção de perturbação tipo pulso



Fonte: Coeuret (1992)

2.10.4 Determinação das curvas da DTR

Através da área sob a curva $c(t)$, é possível a obtenção da curva de distribuição do tempo de residência (DTR), que é a função definida pela razão entre as condutividades elétricas médias obtidas e a área de $c(t)$, com o tempo de monitoramento dessas condutividades. Então, a função DTR é definida pela Equação (7).

$$E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c(t) dt} \quad (7)$$

De acordo com a definição de $E(t)$, a fração de material no intervalo de tempo entre t_1 e t_2 é dada pela Equação (8).

$$\left[\begin{array}{l} \text{Fração do material na saída} \\ \text{que permaneceu no reator} \\ \text{entre os tempos } t_1 \text{ e } t_2 \end{array} \right] = \int_{t_1}^{t_2} E(t) dt \quad (8)$$

Como todo o material que entra no sistema deve sair, entre $t = 0$ e $t \rightarrow \infty$, esse material deve ter um tempo de residência igual a 1. Dessa forma, define-se a Equação (9).

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = 1 \quad (9)$$

2.10.5. Tempo Médio de residência (t_m)

O tempo médio de residência é estimado partindo-se da definição da distribuição do tempo de residência (DTR), na Equação (7). Dessa forma, o produto de $E(t)$ pelo tempo necessário a passagem de todo o traçador pelo sistema, em função desse mesmo tempo, gera a curva do tempo médio de residência. A relação entre a integral (área) sob a curva $t \times E(t)$ em função de t , e a integral da DTR, representa a definição do tempo médio de residência, conforme mostra a Equação (10). O denominador da Equação (10) é igual a 1, conforme definido na Equação (9). O tempo médio de residência representa o tempo médio aproximado, no qual as partículas de fluido permanecem no interior do sistema (Fogler, 1999).

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} tE(t)dt}{\int_0^{\infty} E(t)dt} = \int_0^{\infty} tE(t)dt \quad (10)$$

CAPÍTULO III

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia e o desenvolvimento desse trabalho, em termos de construção, montagem e operação do sistema eletrolítico final de trabalho, foram realizados no âmbito do Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES), da Universidade Federal de Campina Grande.

O presente trabalho foi dividido em duas etapas, assim como segue:

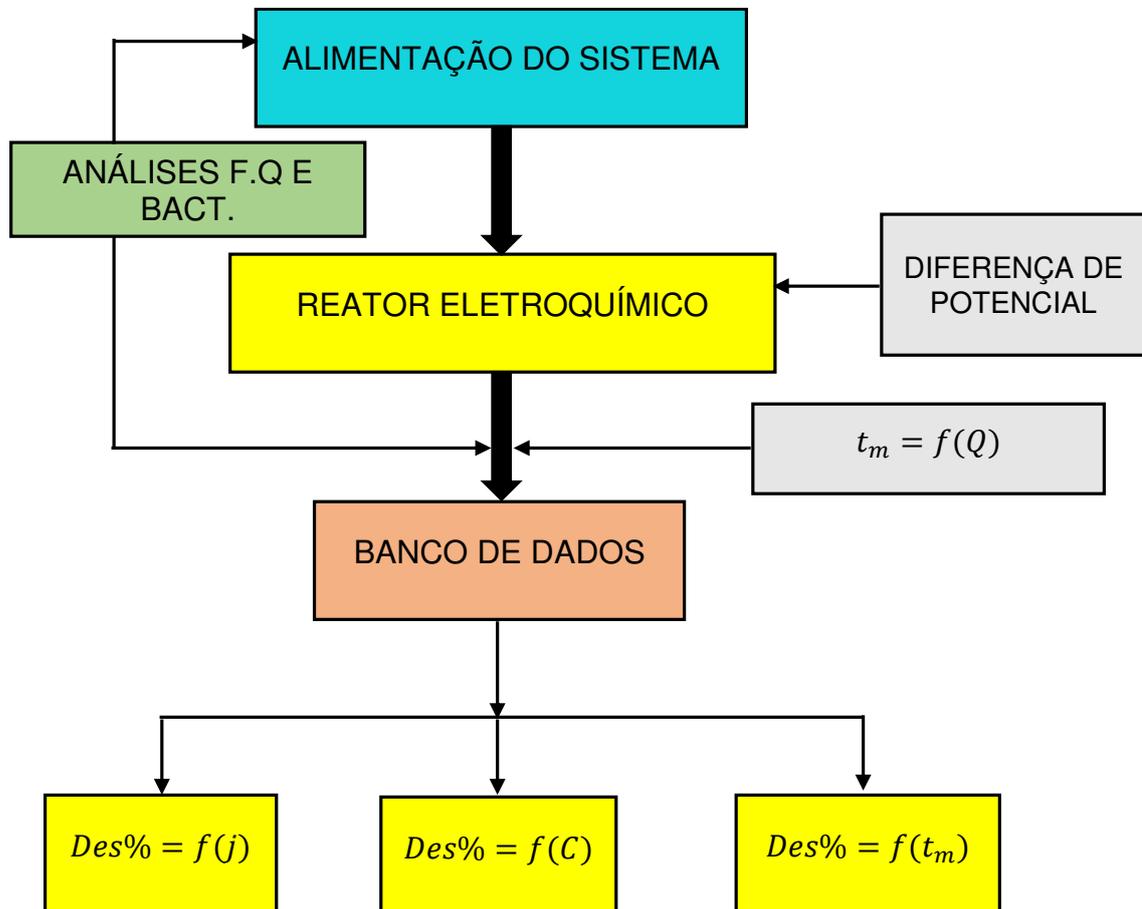
Etapa I – Elaboração de um reator contínuo eletrolítico (modelo de reator final), foram analisados a variação dos parâmetros físico químicos e a desinfecção de bactérias da água de abastecimento da rede LABDES/UFCG, sob uma ordem constante de contaminação por *E. coli* de 10^5 UFC.mL⁻¹ para diferentes potenciais elétricos (ddp) e tempos médios de residências (t_m).

Etapa II – Essa etapa consistiu na caracterização do sistema eletrolítico para diferentes tipos de água de alimentação, deionizada, solução de NaCl e água de abastecimento público local, com base na aplicação de faixas mais amplas de ddp, e considerando um tempo de residência constante, que também foi estimado experimentalmente através do estudo da distribuição do tempo de residência. Outro ponto importante dessa etapa foi a análise dos parâmetros físico-químicos das amostras de águas sem e com adição de *E. coli*. As análises de contagem de *E. coli* só foram realizadas nas amostras previamente contaminadas por esta bactéria. Os níveis de contaminação de *E. coli* foram reduzidos em 2Log_{10} em relação à Etapa I e apenas um teste foi realizado com mesma ordem de contaminação da etapa anterior, para a água de abastecimento público local.

A partir do reator desenvolvido para a realização das Etapas I e II, analisou-se a influência da aplicação de potenciais elétricos e diferentes tempos de residência nos parâmetros físico-químicos e na desinfecção de *E. coli*. Além disso, foi possível caracterizar esse novo sistema com diferentes tipos de águas de alimentação e condições de contaminação de *E. coli*.

A Figura 3.1 mostra o fluxograma de fases de tratamento eletrolítico e análises realizadas para o novo sistema proposto nas Etapas I e II.

Figura 3.1. Fluxograma do processo de tratamento da alimentação do sistema no reator eletrolítico



Legenda: Des%: porcentagem de desinfecção; j: densidade de corrente elétrica; C: concentração de E. coli; t_m : tempo médio de residência.

3.1 Alimentação do sistema

As alimentações do sistema eletrolítico, para as Etapas I e II são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Especificações da origem, níveis de contaminação de *E. coli* inseridos nos fluidos de alimentação e potenciais elétricos aplicados ao sistema eletrolítico

Etapas	Alimentação do sistema	<i>E. Coli</i> (UFC.mL ⁻¹)	ddp (v)
I	H ₂ O Abastecimento LABDES/UFCG	10 ⁵	(3,0 – 9,0) *
II	H ₂ O Deionizada	Ausente	(5,0 – 30,0) **
		10 ³	(5,0 – 30,0) **
	Solução NaCl	Ausente	(2,0 – 13,0) #
		10 ³	(2,0 – 10,0) #
	H ₂ O Abastecimento público local	Ausente	(2,0 – 15,0) #
		10 ³	(2,0 – 16,0) #
10 ⁵		(2,0 – 15,0) #	

Legenda: (*) Variação de ddp=2,0 V; (**) Variação de ddp=5,0 V; (#) Variação de ddp=1,0 V

A água de abastecimento da rede LABDES/UFCG apresenta uma composição mista, sendo uma parcela oriunda da rede de abastecimento público da cidade de Campina Grande e outra parte de origem das chuvas. Essas se misturam na cisterna do prédio e são distribuídas às torneiras do laboratório.

A obtenção da água deionizada, utilizada na primeira fase da Etapa II, ocorre pela passagem da água de abastecimento da rede LABDES/UFCG por uma coluna contendo leito de resina trocadora iônica.

A solução de NaCl, utilizada na segunda fase da Etapa II, é empregada na caracterização do sistema em níveis de condutividade compatíveis com a água de abastecimento público local, sendo essa solução de concentração 0,2g.L⁻¹.

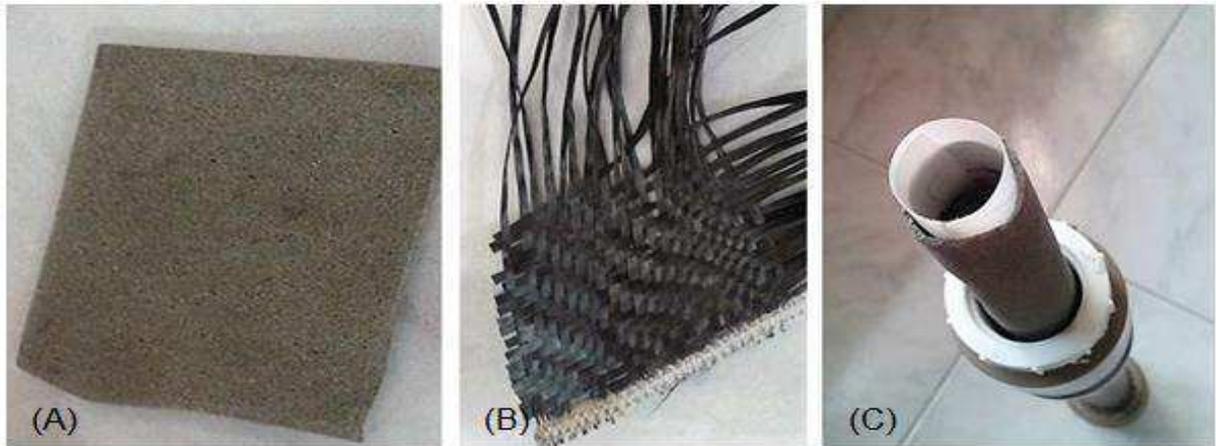
A água de abastecimento público local foi captada de uma torneira externa ao laboratório, para o tanque de alimentação do sistema.

3.2 Reator eletrolítico

Na construção do corpo do reator eletrolítico, para as Etapas I e II, utilizou-se os eletrodos: esponja de Níquel (anodo) e a fibra de Carbono (catodo). Estes foram dispostos em formato cilíndrico, separados por uma malha de Nylon, ficando a esponja de Níquel como o eletrodo externo, e a fibra de carbono como o eletrodo interno. Então, o corpo do reator foi introduzido na carcaça do sistema (tubo de PVC).

A Figura 3.2 apresenta os eletrodos e a disposição dos mesmos no interior da carcaça do reator.

Figura 3.2. Componentes do reator eletrolítico. (A) eletrodo de esponja de Níquel. (B) eletrodo de fibra de Carbono. (C) configuração dos eletrodos no interior do tubo de PVC



A Tabela 3.2 apresenta as dimensões dos eletrodos e da carcaça do reator, bem como as áreas e volumes teóricos do mesmo.

O volume teórico do corpo do reator, apresentado na Tabela 3.2, que é a soma dos volumes de cada componente do mesmo, não pode ser considerado no cálculo do volume de água ocupado no interior do tubo de PVC, que seria a soma dos volumes desses componentes subtraída do volume interno do tubo de PVC. Como os materiais que compõem o corpo do reator apresentam espaços vazios, por terem porosidade, é necessário a utilização do método da proveta para a determinação do volume experimental dos componentes juntos. Dessa forma, em uma proveta com capacidade de 2,0 L, colocou-se 1,0 L de água deionizada, na qual foi inserido o corpo do reator. Esse material foi levemente agitado dentro da água e permaneceu imerso na mesma por cerca de 24 h com a proveta fechada com filme plástico. O teste foi realizado em

triplicata, e mostraram um volume médio ocupado de 5 cm³. A subtração desse valor do volume interno calculado do tubo de PVC (215,51 cm³), resultaram no volume aproximado de 210,0 cm³, que é o volume ocupado pela água no sistema composto pela carcaça e corpo do reator.

Tabela 3.2. Composição e dimensionamento do reator eletrolítico

Materiais	Comprimento (cm)	Altura (cm)	Espessura (cm)	Área (cm²)	Volume (cm³)	DI (cm)
Eletrodo de Níquel	33,6	10,0	0,2	253,2	50,64	2,4
Eletrodo de Carbono	33,6	10,0	0,2	211,11	42,22	2,0
Malha de Nylon	34,0	10,0	0,1	235,0	23,5	2,2
Tubo de PVC	35,0		0,3	307,88	215,51	2,8
Volume teórico do reator					116,36	
Volume real do reator					210,00	

Legenda: DI é o diâmetro interno

3.3 Metodologia para determinação do tempo médio de residência (t_m)

Em relação aos tempos médios de residência (t_m), esses foram estimados experimentalmente para as vazões de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 L.min⁻¹, partindo-se da injeção do tipo pulso de um traçador (solução de NaCl), com concentração de 5g.L⁻¹, e injeção de 60 mL na entrada do reator utilizando uma seringa, conforme mostra a Figura 3.3.

Figura 3.3. Injeção de perturbação em pulso



O monitoramento das concentrações do fluido composto pelo traçador em fluxo juntamente com a água de alimentação do sistema, sendo essa de abastecimento público local, na saída do sistema, foi realizado pelo método condutimétrico.

O condutivímetro OAKTON COM 100 Series foi disposto em um bécker juntamente com a mangueira de saída do efluente do sistema, sob a vazão em teste. O bécker foi inserido em outro maior com um orifício no fundo, permitindo que o líquido ocupasse o primeiro bécker até transbordar e ser descartado pelo orifício do outro bécker. Isso permitiu que o monitoramento da condutividade fosse realizado de forma menos interferente possível. Os dados das medições foram pela filmagem por câmera de celular, até que a condutividade chegasse o mais próximo da inicial. Com isso, foi possível o registro de cada ponto de variação de condutividade ao longo dos ensaios, obtendo-se uma maior representação do escoamento do traçador ao longo dos ensaios experimentais. O aparato para medição das condutividades é apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4. Utensílios e condutivímetro para monitoramento de condutividade elétrica na saída do sistema



3.3.1 Tratamento dos dados para estimativa do tempo médio de residência

De posse dos dados de monitoramento, foram traçadas as três curvas dos perfis de condutividade elétrica na saída do sistema em função do tempo, até que fosse detectado um valor de condutividade o mais próximo possível do valor inicial. Então foi encontrado o perfil da média dessas curvas.

Para a determinação da área sob a curva $c(t)$ versus t , utilizou-se a regra dos trapézios múltiplos, conforme mencionado no Capítulo II, aproximando o perfil da curva a um polinômio de grau 1. Definida a curva da DTR $E(t)$ vs t , construiu-se a curva $t \times E(t)$ vs t . A partir da razão entre a integral dessa curva e a integral de $c(t)$ vs t , sendo essas integrais também calculadas pela regra do trapézio, estimou-se o tempo médio (t_m) de permanência das partículas de traçador no sistema, para as vazões em estudo.

3.4. Sistema eletrolítico

Após o processo de construção do corpo do reator eletrolítico, a etapa seguinte foi a montagem dos sistemas de captação da água de alimentação do sistema, e de coleta após sua passagem pelo reator. Dessa forma, foi disposta, à

montante do reator, uma bombona com capacidade de 120 L, de onde foram captados os fluidos de alimentação para o interior do reator, através de uma bomba d'água DANCOR de potência $\frac{1}{2}$ Cv.

A homogeneização da alimentação, antes da passagem pelo reator foi realizada através de um *Bypass*, durante cerca de 5 min. A vazão do fluido no sistema pôde ser controlada por meio de uma válvula associada a um rotâmetro, dispostos à jusante do reator. O fluido de saída foi direcionado à outra bombona, com a finalidade de descarte de forma adequada.

Os eletrodos foram conectados a uma fonte de alimentação elétrica digital dupla Minipa MPC 303-DI, conectados com fios de cobre. O eletrodo de esponja níquel foi conectado ao polo positivo, e o de fibra de carbono ao polo negativo. As diferenças de potenciais foram ajustadas na fonte elétrica, e a corrente elétrica gerada é monitorada utilizando-se um multímetro digital, através da conexão de fios de cobre do multímetro para os fios de conexão dos eletrodos.

O fluxograma do sistema eletrolítico é apresentado na Figura 3.5, e a Figura 3.6 mostra o sistema montado na bancada para os ensaios experimentais.

Figura 3.5. Representação esquemática do fluxograma do processo eletrolítico

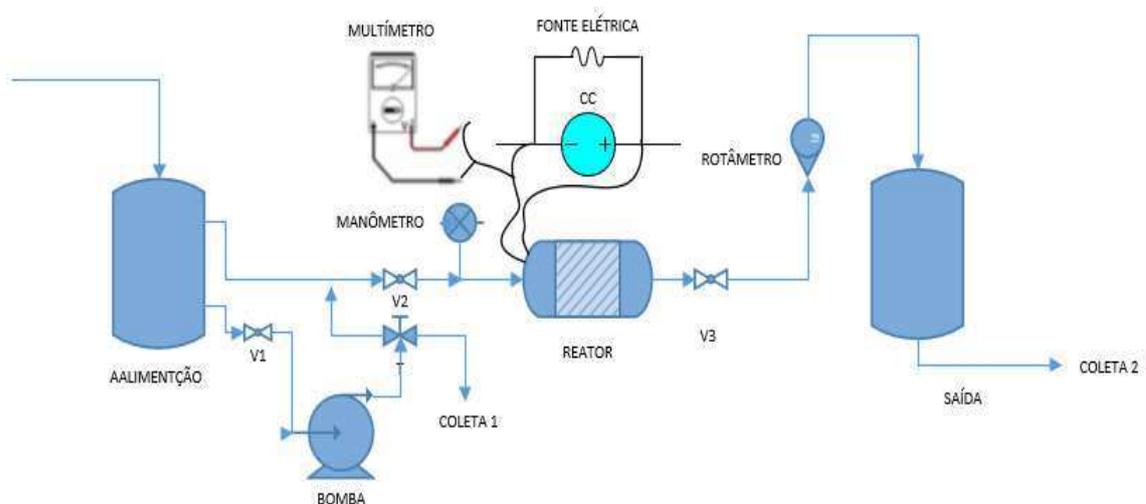


Figura 3.6. Sistema eletrolítico montado em bancada de trabalho



3.5. Metodologia das etapas experimentais

A condução dos experimentos foi realizada nas *Etapas I e II*, sendo consideradas no planejamento e execução das mesmas o estudo da influência dos seguintes fatores na desinfecção de águas contaminadas com bactérias *E coli*:

- Concentração de *E. coli* no meio aquoso;
- Tempo de residência do meio aquoso no reator;
- Densidade de corrente elétrica associada à corrente elétrica do processo relacionada à diferença de potencial aplicada.

Baseado nesse princípio, as descrições detalhadas dos procedimentos experimentais realizadas nas Etapas I e II são apresentadas nas seções 3.4.1 e 3.4.2.

3.5.1- *Etapa I*

A Etapa I foi realizada para o tipo de água, faixa de diferenças de potenciais e concentração de *E. coli* na mesma conforme descrito na Tabela 3.1 do item 3.1, considerando-se ainda as vazões de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 L.min⁻¹.

A sequência experimental realizada em triplicata é descrita em seguida:

1. Preparação da água de alimentação do sistema, adicionando-se 1mL de inóculo de *E. coli* (~ 15h de inoculação no meio de cultura) em 100

L de água de abastecimento da rede LABDES/UFCG, para obtenção de um meio aquoso com ordem de concentração de *E. coli* de 10^5 UFC.mL⁻¹;

2. homogeneização da água com o inóculo de *E. coli* durante 5 minutos através de um *bypass* no sistema;
3. ajuste da vazão em 0,5 L.min⁻¹, e coleta das amostras da água de alimentação e na saída do sistema após a aplicação dos potenciais elétricos de 3,0; 5,0; 7,0 e 9,0V, respectivamente.
4. o mesmo procedimento foi realizado para as vazões de 1,0; 1,5 e 2,0 L.min⁻¹;
5. monitoramento da corrente elétrica para cada ddp associada às vazões, através de multímetro digital HYG[®] DT 830D;
6. após a coleta das amostras, foi realizada inicialmente a análise de contagem de colônias de *E. coli*, utilizando membranas de nitrato de celulose UNIFIL 0,45um 47mm;
7. posteriormente, foram realizadas as análises físico-químicas das amostras de fluido coletadas, considerando os parâmetros: condutividade elétrica, pH, Turbidez e Cor.

3.5.2 - Etapa II

A Etapa II foi proposta para investigar o comportamento da água deionizada, solução de NaCl e água de abastecimento público local, sob as condições de contaminação de *E. coli* e potenciais elétricos aplicados ao sistema descritos na Tabela 3.1, e vazão constante de 0,5 L.min⁻¹. Os ensaios também foram realizados em triplicata.

Para a contaminação das águas, utilizou-se 0,5 mL de inóculo de *E. coli* em 100 L de meio líquido, obtendo-se as concentrações na ordem de 10^3 UFC.mL⁻¹. A

água de abastecimento público local foi analisada, além da ordem de 10^3 UFC.mL⁻¹, na ordem de 10^5 UFC.mL⁻¹, para analisar viabilidade da utilização do reator em águas mais contaminadas, mesmo que de forma controlada em laboratório. Para essa última, contaminou-se 100 mL dessa água com 1,0 mL de inóculo da bactéria.

Os procedimentos para a aplicação dos potenciais elétricos aos eletrodos e leitura das correntes foram análogos à Etapa II, embora esses potenciais terem sido aplicados em faixas mais amplas no intuito de melhorar a caracterização do sistema.

As análises de contagem de *E. coli* e dos parâmetros físico-químicos também foram realizadas conforme a Etapa I, sendo que, na Etapa II foi incluída a análise de concentração de íons cloreto (Cl⁻) nas amostras de águas coletadas na alimentação do sistema e após o tratamento no reator, além da análise de concentração de níquel na água de abastecimento público local contaminada com *E. coli* na ordem de 10^3 UFC.mL⁻¹ após as diferenças de potenciais aplicados, no intuito de analisar se o metal estaria sendo depositado no meio líquido em níveis adequados conforme a Portaria Nº 2914/2011, do Ministério da Saúde.

3.6 Procedimentos para as análises de contagem de *E. coli* e dos parâmetros físico-químicos

Nesse item são descritas a sequência de procedimentos realizados antes de se iniciar os ensaios experimentais, e os métodos para quantificar as colônias de *E. coli* presentes nas amostras coletadas, bem como a determinação dos parâmetros físico-químicos.

Considerando que a pesquisa foi desenvolvida no âmbito da microbiologia, foi necessário maior atenção e planejamento na esterilização de utensílios utilizados e testes de crescimento da bactéria *E. coli*. Nas seções seguintes são descritas as metodologias desde a preparação do inóculo da bactéria, até os procedimentos de análises de contagem das mesmas, bem como as metodologias de determinação dos parâmetros físico-químicos.

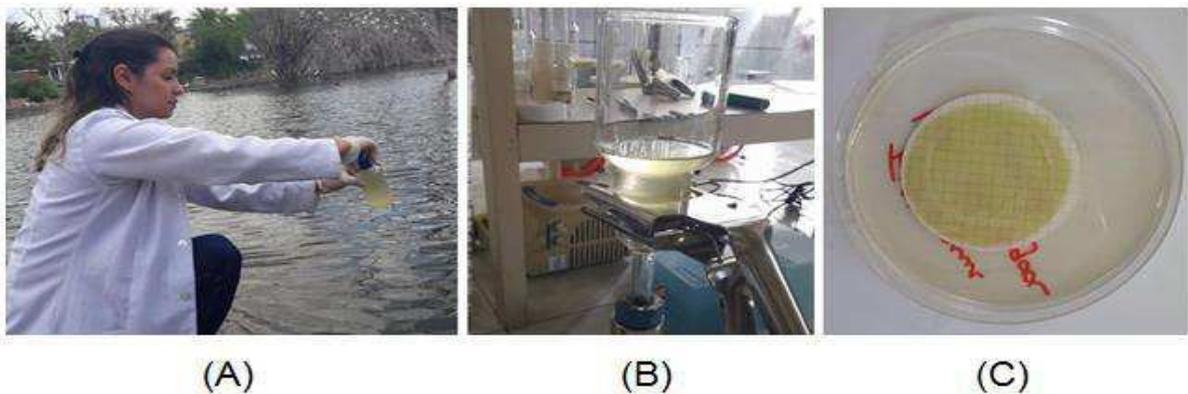
3.6.1 Preparação do inóculo de *E. coli*

A semeadura e isolamento da bactéria *Escherichia Coli* foi realizada através da técnica de esgotamento em estrias, conforme descrito na sequência:

1. o processo iniciou-se com a filtragem de uma amostra de 50mL de água residual, proveniente de lagoa localizada na UFCG, em membrana filtrante de nitrato de celulose quadriculada UNIFIL 0,45 μm 47 mm, seguindo a metodologia do *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 22 th edition, 2012*. A membrana foi colocada em placa Petri descartável estéril (90x15mm), contendo o meio de cultura sólido T.B.X (Tryptone-Bile X-glucuronídeo) MEDIUM OXOID, seletivo para *E. coli*.

A Figura 3.7 mostra as etapas de coleta da água residual até o produto de sua filtragem.

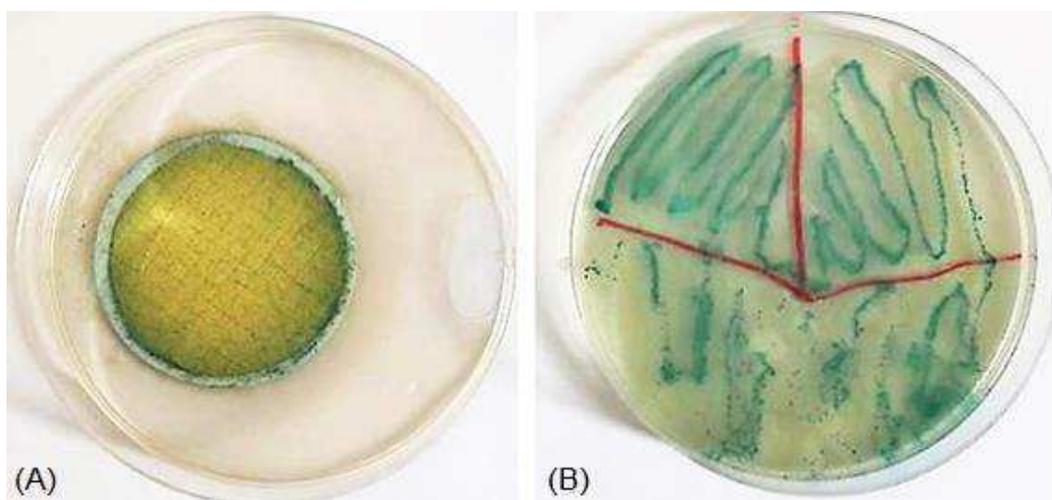
Figura 3.7. (A) Coleta de água residual em lagoa da UFCG; (B) Filtragem da água coletada; (C) Filtrado em meio de cultura pronto para incubação.



2. o material filtrado na membrana foi incubado em estufa biológica à temperatura de 37°C, por até 24h.
3. Como o objetivo foi o isolamento da *E. coli*, realizou-se o processo de estriamento e esgotamento da bactéria, que é baseado no espalhamento de parte dos microrganismos que cresceram na primeira placa Petri, em outra placa contendo o mesmo meio de cultura. Esse espalhamento foi feito com uma alça de platina previamente esterilizada em Bico de Busen e posteriormente resfriada naturalmente até a temperatura ambiente. A incubação do material espalhado na placa foi realizada nas mesmas condições mencionadas no item 2;

- o esgotamento foi realizado dividindo-se a placa Petri contendo o meio sólido em três regiões, e em cada uma delas foi feita uma estria em formato de zig-zag. A partir de uma alçada direta do material inoculado por 24 h fez-se a primeira estria. As alçadas realizadas para as estrias 2 e 3 foram realizadas na sequência. A Figura 3.8 apresenta as placas Petri com a amostra das bactérias a serem isoladas e o resultado após estriamento e incubação.

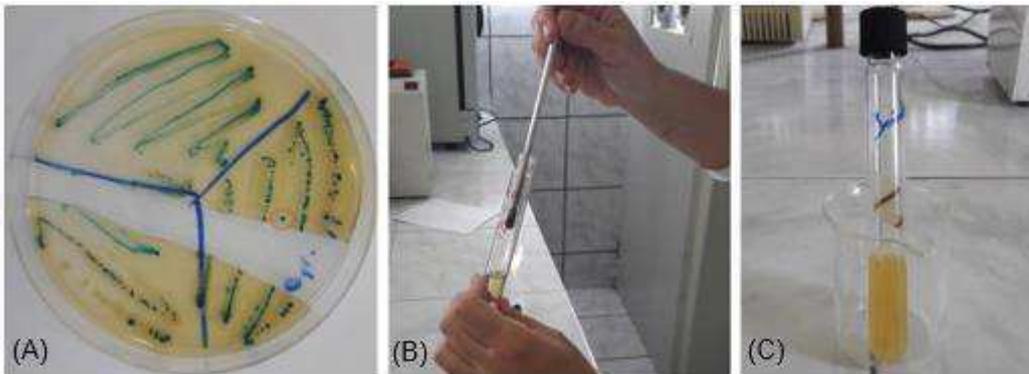
Figura 3.8. (A) Bactérias filtradas e incubadas em meio sólido; (B) Estriamento de uma amostra de bactérias incubadas em meio sólido.



- O estriamento foi repetido até a obtenção de pelo menos uma colônia de *E. coli* totalmente isolada. A partir dessa colônia isolada, foi realizada sua difusão em um meio de cultura líquido e estéril, específico para o crescimento da *E. coli*, através de uma alça bacteriológica de platina. O material foi incubado a 37 °C e então pôde ser utilizado na contaminação dos fluidos de alimentação do sistema eletrolítico.

A Figura 3.9 mostra a formação de colônias mais isoladas, decorrentes das repetições do processo de estriamento, a difusão de uma delas em meio de cultura líquido, e o meio de cultura líquido já contaminado após a incubação por 24 h a 37 °C, respectivamente.

Figura 3.9. Colônia de *E. coli* isolada (A); difusão de colônia isolada em meio de cultura líquido (B); meio de cultura contaminado com *E. coli* (C)



A composição do meio de cultura líquido MSB para o crescimento de *E. coli*, bem como as proporções dos reagentes utilizados para cada litro de água deionizada foram fornecidas pela *British Standards Institution* (2001). Essa composição é apresentada na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Composição e quantificação do meio de cultura Modified Scholtens' Broth (MSB)

Composição do meio	Quantificação
Peptona	10g
Extrato de levedura	3,0 g
Extrato de carne	12,0 g
NaCl	3,0 g
Solução de Na ₂ CO ₃ (150 g.L ⁻¹)	5,0 mL
Solução de MgCl ₂ (100g MgCl ₂ .6H ₂ O/50mL H ₂ O)	0,3 mL
Água deionizada	1000 mL

Fonte: *British standards Institution* (2001)

3.6.2 Composição e preparação do meio seletivo T.B.X para *E. coli*

O substrato T.B.X, necessário ao crescimento da *E. coli*, apresenta a composição apresentada na Tabela 3.4, obtendo-se as condições de pH 7,2 e T de 25°C.

Tabela 3.4. Composição e quantificação do meio de cultura T.B.X MEDIUM OXOID

Composição	Quantificação (g.L⁻¹)
Triptona	20,0
Agar	15,0
Sais biliares	1,50
X-glucuronido	0,08

Fonte: Fabricante OXOID

O meio de cultura T.B.X (Tryptone-Bile X-glucuronídeo) foi preparado através de sua dissolução em água deionizada aquecida em micro-ondas até o seu ponto de ebulição, de acordo com as proporções informadas pelo fabricante OXOID. Dessa forma, para cada litro de água, foram dissolvidos 36,6 g do meio em pó. O meio adicionado à água aquecida foi novamente levado ao micro-ondas até o ponto de ebulição, garantindo a completa dissolução e esterilização do mesmo. Esse foi distribuído, após leve resfriamento, em placas Petri, em volumes suficientes para disposição das membranas filtrantes. Este conteúdo permaneceu em repouso à temperatura ambiente, até adquirir consistência gelatinosa.

3.6.3 Análises de contagem de colônias de *E. coli*

As análises de contagem das colônias de *E. coli* das amostras coletadas de águas de alimentação do sistema a após a aplicação dos potenciais elétricos, foram realizadas de acordo com a metodologia da membrana filtrante (MF) para Coliformes Totais, descrita no *Manual Prático de Análise de Água* (2013), da *Fundação Nacional de Saúde* (Funasa), seguindo as técnicas preconizadas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, de autoria das instituições *American Public Health Association* (APHA). Os utensílios necessários às análises foram previamente autoclavados à 121°C e 15 *psi*, durante 15 minutos, para a esterilização dos mesmos.

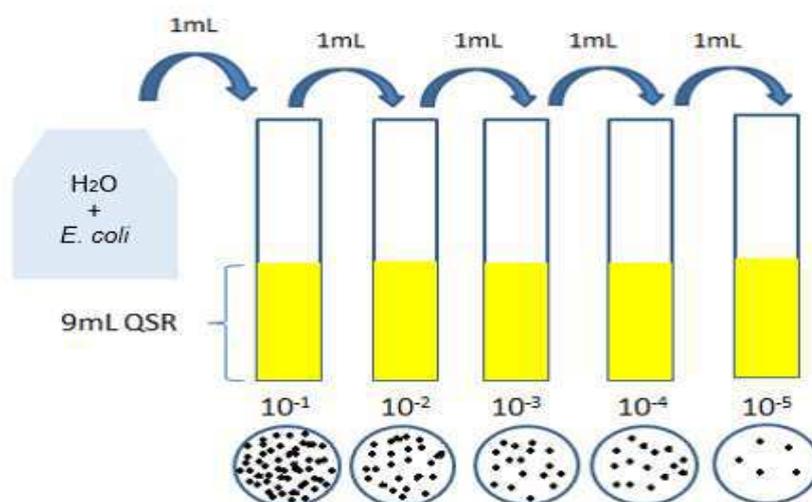
As amostras foram coletadas em frascos de vidro e identificadas, de acordo com as condições específicas de cada ensaio experimental. A bancada foi previamente limpa com solução de álcool etílico a 70%, e nela foram dispostos um

Bico de Bunsen a gás, com sua chama ligada durante todo o procedimento de análise, devido a constante necessidade de flambar os utensílios para filtragem e manuseio das membranas filtrantes.

Tubos de ensaio em suporte foram utilizados nas diluições das amostras a serem filtradas, utilizando para isso uma solução de diluição (QSR) OXOID, na proporção de duas pastilhas para cada litro de água deionizada. Uma micropipeta e ponteiros para pipetagem foram utilizadas para retirada dos volumes das alíquotas das amostras a serem filtradas.

As amostras foram diluídas conforme as escalas de concentrações iniciais conhecidas. Então, para amostras de níveis de concentração de *E. coli* na ordem de 10^5 UFC.mL⁻¹, foram necessárias, no mínimo, cinco diluições para que a contagem das colônias fosse acompanhada em cada ordem logarítmica. A diluição 1:10 (10^{-1}) foi realizada adicionando-se 1mL da amostra de água em 9mL da solução de diluição QSR presente em um tubo de ensaio, e em seguida o produto da diluição foi homogeneizado em um agitador de tubos. Para a diluição de 1:100 (10^{-2}), adicionou-se 1mL do produto da diluição de 10^{-1} em 9mL de solução QSR, presente em outro tubo de ensaio, homogeneizando-se o conteúdo. As diluições posteriores seguiram o mesmo procedimento. A Figura 3.10 representa as sucessivas diluições das amostras para filtragem.

Figura 3.10. Método de diluição de amostras para filtragem



As membranas filtrantes foram dispostas sobre a área porosa do filtro previamente esterilizado em água fervente, resfriado naturalmente à temperatura

ambiente, e disposto no suporte de filtragem a vácuo. Um Kitassato foi utilizado para coleta dos resíduos do filtrado. Então a base do filtro foi vedada com um copo encaixado ao mesmo com o auxílio de uma garra metálica. Um pequeno volume de solução QSR foi colocado no filtro juntamente com uma alíquota de 1 mL de amostra a ser filtrada.

As membranas após a filtragem foram dispostas no meio sólido T.B.X contido nas placas Petri, utilizando uma pinça flambada no Bico de Busen. Essas placas foram dispostas na posição invertida em estufa bacteriológica à 37°C por 24 h. Após esse período de tempo, observou-se nas membranas a formação de pontos esverdeados, nomeados de *unidades formadoras de colônias*, característicos da presença de *E. coli* no meio de cultura. Então, de acordo com as diluições, a contagem do total de pontos foi dividida pela diluição, e esse valor multiplicado pelo volume de amostra filtrada, que correspondeu ao número de colônias de bactérias por mililitro de água.

3.6.4 Análises Físico-químicas

Para as *Etapa I e II*, as análises físico-químicas realizadas em comum nas amostras de água, antes e após o tratamento no reator eletrolítico, foram as seguintes:

1. Condutividade elétrica: condutímetro DEL LAB®, modelo DL – 150.
2. pH: potenciômetro HANNA HI 8424.
3. Turbidez: turbidímetro Hach 2100P
4. Cor: na *Etapa I* utilizou-se o NESSLER QUANTI 200, através da comparação visual com padrões de cores da escala Platino-Cobalto. Para a *Etapa II* foi utilizado o fotômetro medidor de cor AKSO AK530 em unidade uH, equivalente a 1,0 mg.L⁻¹ Pt-Co.

Na *Etapa III* a análise de concentração de íons cloreto foi adicionada para identificar a formação ou consumo de cloro livre nos meios submetidos ao reator eletrolítico. Para isso, utilizou-se o método titulométrico, sendo o titulante a solução de AgNO₃ (0,5 M) e o indicador, o cromato de potássio (K₂CrO₄)

3.7 Análise de níquel por Espectrometria de Absorção Atômica com chama

A necessidade da análise de níquel em amostras de água coletadas após a passagem do fluido de alimentação do sistema pelo reator eletrolítico fez-se necessária devido ao anodo do mesmo ser composto por 99 % de Níquel, que por ser um metal pesado é indesejável ao final do processo.

De acordo com a Portaria Nº 2914/2011 do Ministério da Saúde, o valor máximo permissível para o níquel na água é de 0,07 mg. L⁻¹.

As amostras de água selecionadas para a análise de absorção atômica com chama são referentes à terceira repetição experimental referente à água de abastecimento público local com contaminação de *E. coli* na ordem de 10³ UFC.mL⁻¹ (Etapa II). Então, foram analisadas a água de alimentação do sistema e mais 14 amostras para as densidades de corrente elétrica aplicadas (0 – 11,71 mA.cm⁻¹).

A análise de absorção atômica com chama foi realizada no âmbito do LABDES/UFCG, no equipamento VARIAN AA240, e a leitura dos dados foi feita através do *Software SpectrAA*.

A chama produzida para as análises em específico foi resultado da mistura dos gases: acetileno (combustível) e ar (oxidante). Isso gera uma temperatura na faixa de 2100-2250 °C e velocidade de queima de 266 cm.s⁻¹.

A sequência de ações para a operação do espectrômetro de absorção com chama é a seguinte:

- 1) Introdução da amostra via nebulizador;
- 2) atomização ocorre no queimador;
- 3) queimador orientado com o feixe de radiação;
- 4) amostra passa do estado fundamental ao primeiro estado de excitação;
- 5) absorção de energia radiante proporcional à Lei de Beer-Lambert (quantificação)

3.8 Análise de Microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos eletrodos

As análises de microscopia eletrônica de varredura, que tem a finalidade de estudar a microestrutura de materiais sólidos, foram realizadas no âmbito do Laboratório de caracterização de Materiais (LCM), na UFCG, para amostras dos eletrodos de Níquel e carbono antes e após os processos de eletrólise. O equipamento utilizado foi do fabricante Shimadzu, modelo SuperScan SS500.

3.9 Análise de variabilidade de dados

Foram realizadas as análises de variabilidade de dados na Etapa II, com a finalidade de determinar se as suposições de mínimos quadrados comuns foram atendidas para as respostas de colônias de *E. coli* em função das densidades de corrente. Nesse sentido, analisou-se a relação entre o número de colônias de *E. coli* e às densidades de corrente aplicadas nos ensaios experimentais para as águas deionizada e solução de NaCl com concentrações de *E. coli* iniciais na ordem de 10^3 UFC.mL⁻¹, e águas de abastecimento público local nas concentrações de 10^3 e 10^5 UFC.mL⁻¹, respectivamente. Nesse estudo foi utilizado o *software* Minitab® 18. Os resultados dessas análises são apresentados no Apêndice E.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente é apresentado o estudo do tempo médio de residência referente às vazões que foram empregadas no sistema eletrolítico, por tratar-se de uma condição operacional fundamental na caracterização desse sistema.

Conforme mencionado no Capítulo III, para as Etapas I e II foram propostas condições de alimentação do sistema eletrolítico contínuo, e de operação distintas, que geraram dados de contagem de colônias de *E. coli* e dos parâmetros físico-químicos das amostras coletadas. Dessa forma, a análise desses parâmetros foi fundamental à investigação da eficiência na desinfecção de *E. coli* nas águas estudadas.

De forma complementar, foram analisadas a influência do processo eletrolítico na morfologia dos eletrodos de esponja de níquel e fibra de carbono, bem como na possível deposição de níquel (Ni) nas amostras coletadas. Também foi considerado o estudo da influência da densidade de corrente, característica das diferenças de potenciais aplicadas ao sistema sobre a desinfecção das águas contaminadas com *E. coli* em laboratório.

4.1 Tempo de residência

A estimativa do tempo de residência para as vazões de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 L.min⁻¹ iniciou-se com a construção das curvas das condutividades elétricas monitoradas na saída do sistema eletrolítico a partir do instante em que foi feita a injeção de traçador no mesmo, em função do tempo.

A partir do cálculo das áreas dos perfis médios das condutividades em função do tempo. Com auxílio da Equação (7), expressa na seção 2.10.4 do Capítulo II, determinou-se as funções $E(t)$ referentes às distribuições do tempo de residência, onde foi possível a construção das curvas de DTR.

O tempo médio de residência (t_m) foi determinado em função das curvas da DTR, pela relação expressa na Equação (10) (seção 2.10.5 do Capítulo II).

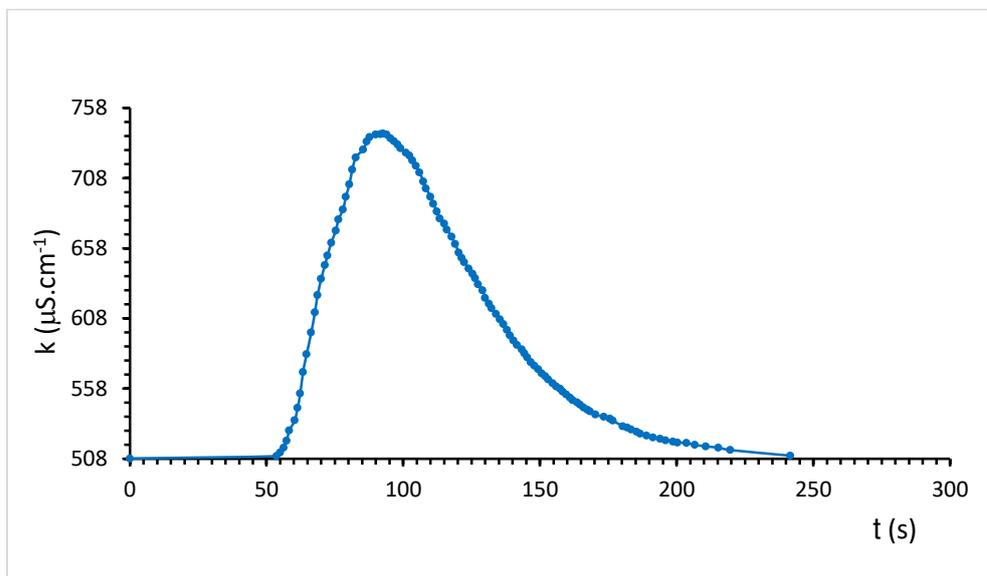
Nesse sentido, são apresentadas a seguir, para as vazões de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 L.min⁻¹, respectivamente, as curvas de condutividade do meio na saída do sistema em função do tempo, a curva de distribuição do tempo de residência, e finalmente as curvas do produto $t \times E(t)$ versus tempo, através da área sob a qual é calculado o tempo médio de residência.

Todos os dados referentes aos experimentos realizados para cada vazão em triplicata são apresentados no Apêndice B. As curvas de condutividade em função do tempo para as réplicas experimentais de cada vazão são apresentadas no Apêndice C.

- $Q=0,5 \text{ L.min}^{-1}$

A Figura 4.1 apresenta o comportamento da condutividade elétrica monitorada na saída do sistema em função do tempo, para a respectiva vazão.

Figura 4.1. Perfil da média das curvas $k(t)$ em função do tempo para os Experimentos I, II e III ($Q = 0,5 \text{ L.min}^{-1}$)



A área sob a curva resposta apresentada na Figura 4.1 foi calculada pela regra dos trapézios múltiplos (Chapra & Canele, 2011). Os valores dos termos para o cálculo das áreas dos trapézios seccionados sob a curva $k(t)$ versus t são apresentados na Tabela 4.1, bem como a área calculada a partir dos mesmos.

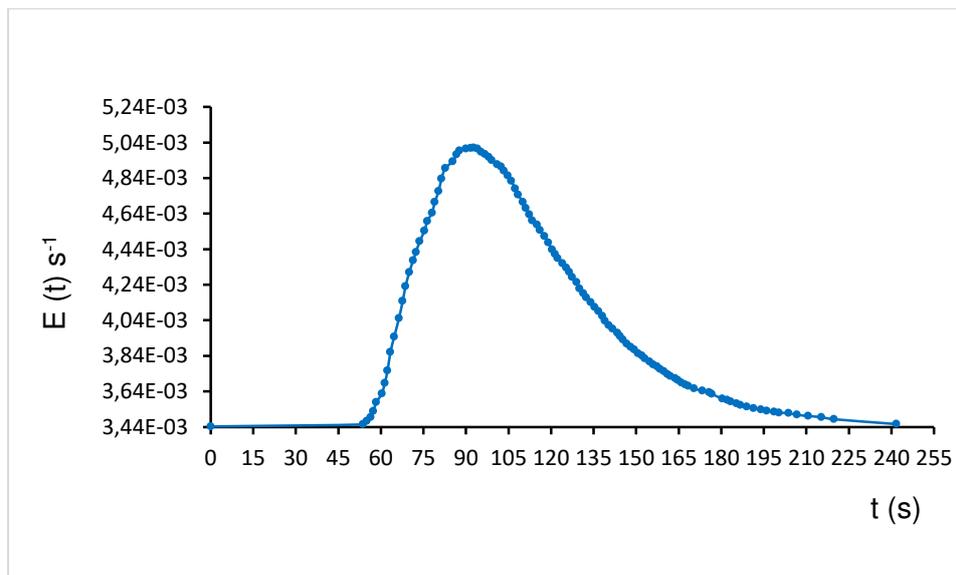
Tabela 4.1. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $k(t)$ em função do tempo ($Q = 0,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

a	b	n	$h = \frac{(b-a)}{n}$	$f(a) + f(b)$	$2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i)$	Área
0	241,67	110	2,18	1018,67	66686	146296

A curva $k(t)$ delinea a distribuição do tempo de residência dos elementos fluidos no volume V do reator, nas condições escolhidas para o teste.

O valor da área sob a curva $k(t)$ é substituída na Equação (7) para a determinação de $E(t)$. Então, a curva de $E(t)$ *versus* t pode ser construída, representando a normalização de $k(t)$, ou seja, a curva de distribuição do tempo de residência (DTR). A Figura 4.2 mostra o perfil da DTR para vazão de $0,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

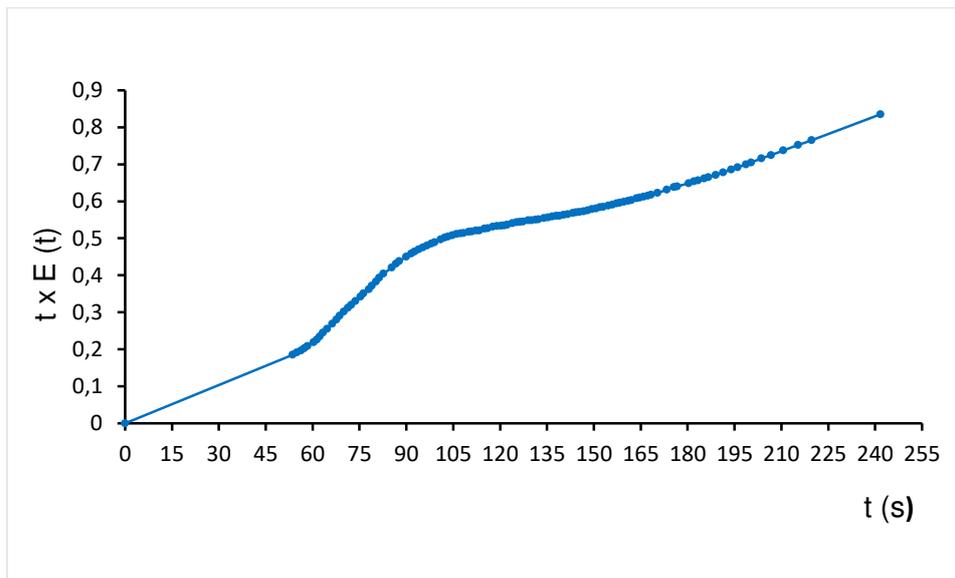
Figura 4.2. Perfil da curva de distribuição do tempo de residência (DTR) ($Q = 0,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)



4.1.1 Tempo médio de residência (t_m)

A última etapa no estudo do tempo de residência é a estimativa do tempo médio de residência (t_m). De acordo com a definição do t_m , Equação (10) do Capítulo II, o produto da função DTR $E(t)$ pelos tempos de monitoramento das condutividades elétricas na saída do sistema ($t \times E(t)$) em função desses mesmos tempos, geram a curva resposta do t_m , apresentada na Figura 4.3.

Figura 4.3. Perfil da curva do produto de $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 0,5 \text{ L.min}^{-1}$)



A área sob a curva $t \times E(t)$ em função de t também é calculada pela regra dos trapézios múltiplos.

A Tabela 4.2 mostra os termos para determinação da área sob a curva $t \times E(t)$ vs t e seu valor final (t_m).

Tabela 4.2. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 0,5 \text{ L.min}^{-1}$)

a	b	n	$h = \frac{(b-a)}{n}$	$f(a) + f(b)$	$2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i)$	Área (t_m) (s)
0	241,67	111	2,18	0,84	55,67	121,8

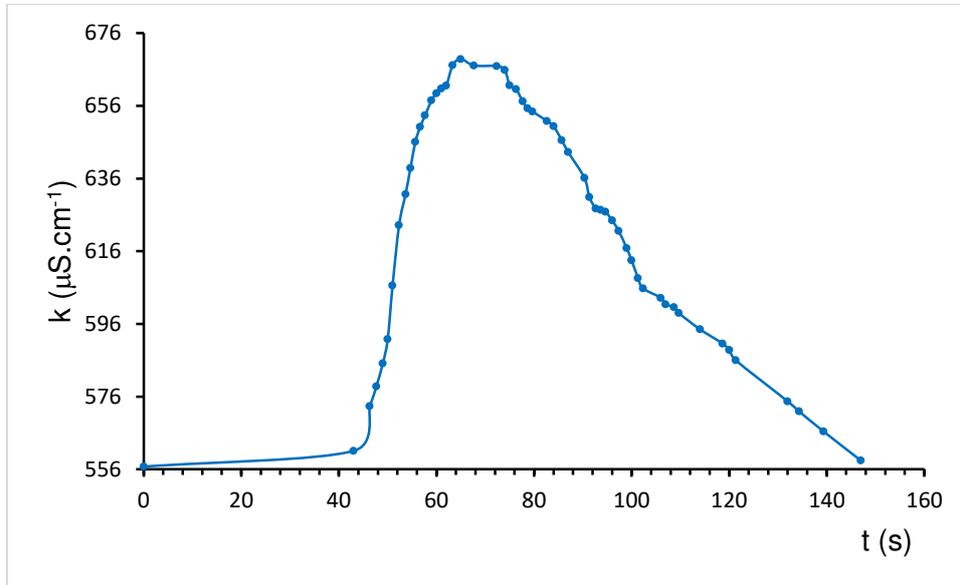
Portanto, considerando a vazão de $0,5 \text{ L.min}^{-1}$, o tempo médio o qual as partículas de fluido permaneceram no sistema eletrolítico foi de $t_m = 121,8 \text{ s}$.

De forma análoga à vazão de $0,5 \text{ L.min}^{-1}$, para as vazões de $1,0$, $1,5$ e $2,0 \text{ L.min}^{-1}$, a construção das curvas de $k(t)$ vs t , de $E(t)$ vs t e de $t \times E(t)$ vs t , com a finalidade de determinar a DTR e o t_m , a metodologia é a mesma, como pode ser observado em seguida.

- $Q = 1,0 \text{ L.min}^{-1}$

O perfil médio da condutividade elétrica em função do tempo para a vazão de $1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, é apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4. Perfil da média das curvas $k(t)$ em função do tempo para os Experimentos I, II e III ($Q = 1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)



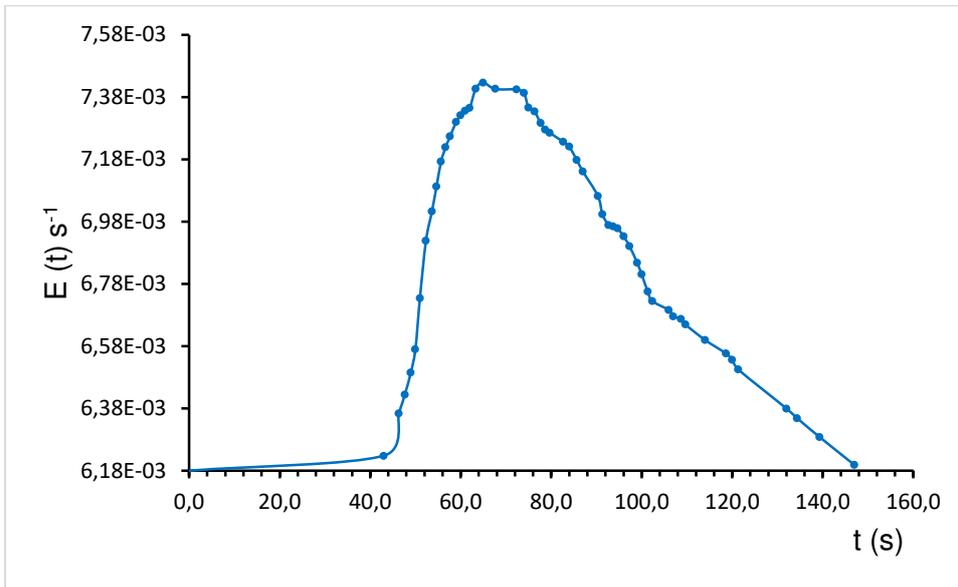
O valor da área sob $k(t)$ vs t é apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $k(t)$ em função do tempo ($Q = 1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

a	b	n	$h = \frac{(b-a)}{n}$	$f(a) + f(b)$	$2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i)$	Área
0	147	54	2,72	1115,07	32512,3	90023,43

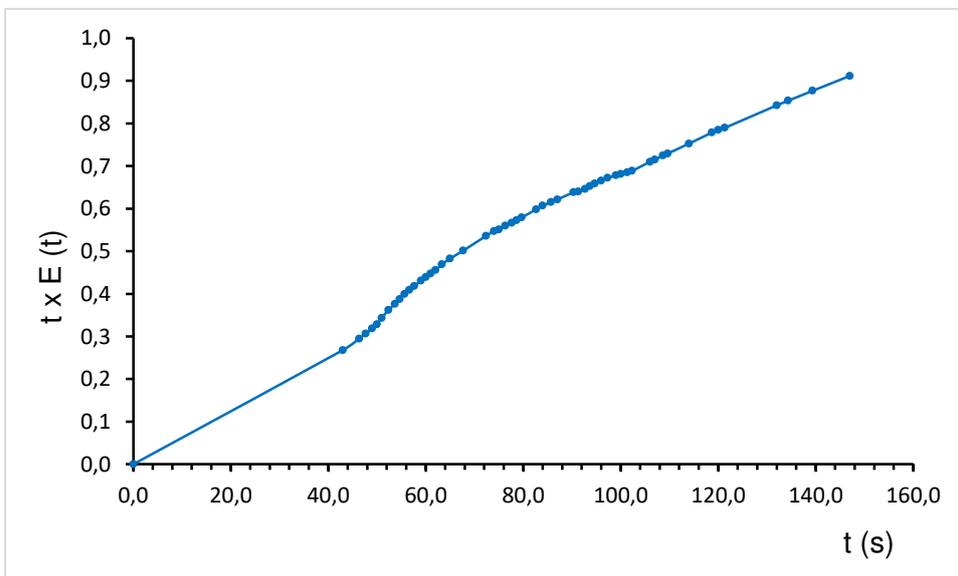
A partir da área sob $k(t)$ vs t , pode ser determinada a curva da DTR, conforme mostra a Figura 4.5.

Figura 4.5. Perfil da curva de distribuição do tempo de residência (DTR) ($Q = 1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)



A partir da DTR, a curva de $t \times E(t)$ vs t também é construída, como pode ser vista na Figura 4.6.

Figura 4.6. Perfil da curva do produto de $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)



Pela regra dos trapézios, a área sob a curva da Figura 4.6 (t_m) pode ser calculada a partir do somatório dos valores dos termos determinados individualmente. A Tabela 4.4 mostra esses valores.

Tabela 4.4. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

a	b	n	$h = \frac{(b-a)}{n}$	$f(a) + f(b)$	$2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i)$	Área (t_m) (s)
0	147	54	2,72	0,91	59,33	82,2

Nesse caso, para a vazão de $1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, foi estimado o tempo médio de residência de 82,2 s das partículas de fluido no sistema.

Para as vazões de $1,5$ e $2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, apresentam-se as curvas resposta e os valores dos termos referentes ao cálculo das áreas sob as curvas de $c(t)$ vs t e $t \times E(t)$ vs t , de forma direta, já que trata-se da mesma metodologia e sequência empregadas para a determinação do t_m em $0,5$ e $1,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

- $Q = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Figura 4.7. Perfil da média das curvas $k(t)$ em função do tempo para os Experimentos I, II e III ($Q = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

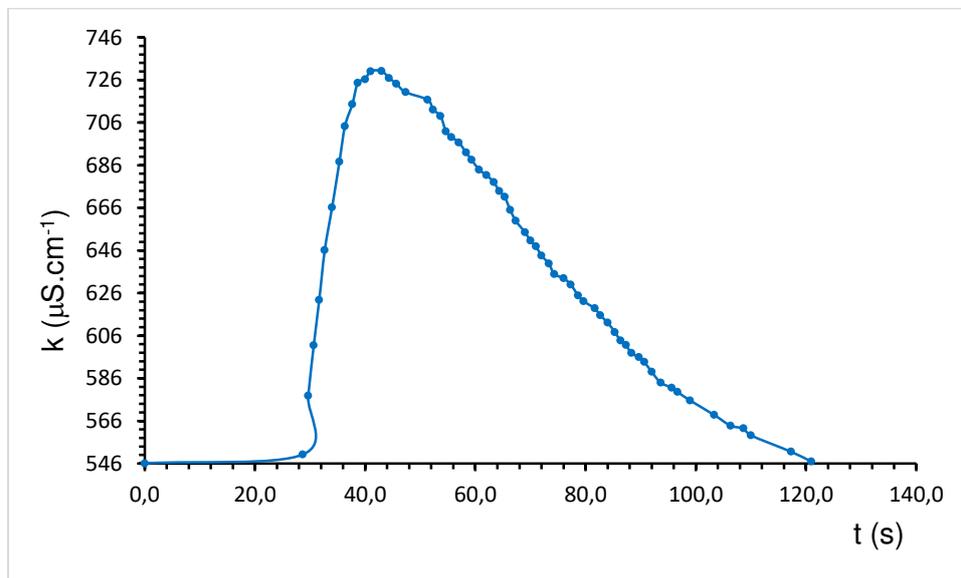
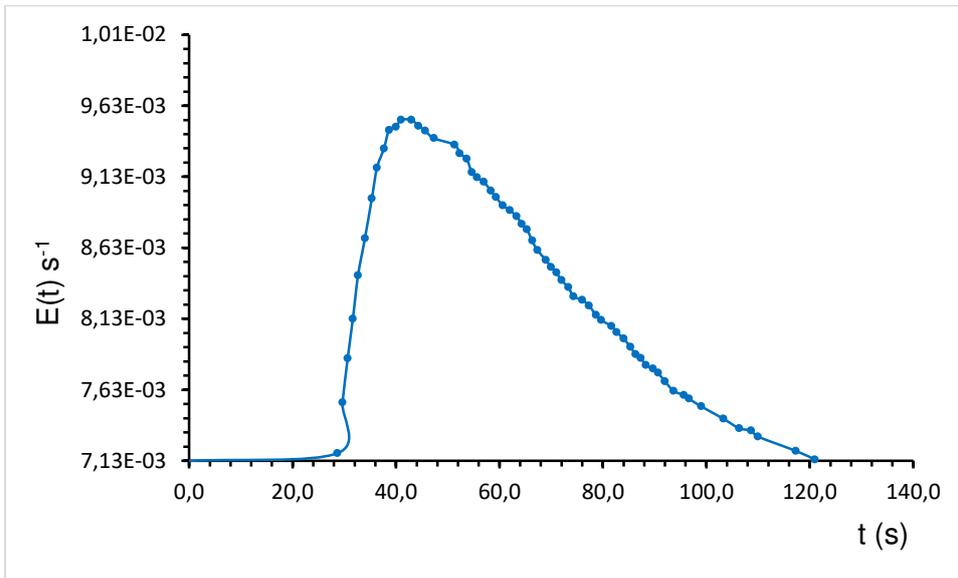
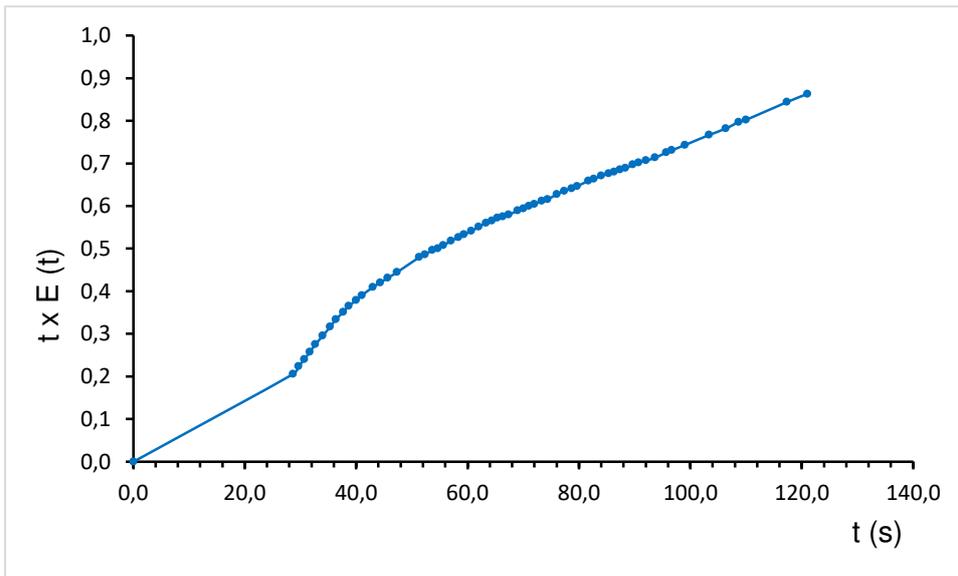


Tabela 4.5. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $k(t)$ em função do tempo ($Q = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

a	b	n	$h = \frac{(b-a)}{n}$	$f(a) + f(b)$	$2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i)$	Área
0	121	62	1,95	1092,93	77450,07	90023,43

Figura 4.8. Curva da distribuição do tempo de residência (DTR) ($Q = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)**Figura 4.1.** Perfil da curva do produto de $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)**Tabela 4.6.** Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

a	b	n	$h = \frac{(b-a)}{n}$	$f(a) + f(b)$	$2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i)$	Área (t_m) (s)
0	121	62	1,95	0,86	66,49	65,4

- $Q = 2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

Figura 4.10. Perfil da média das curvas $k(t)$ em função do tempo para os Experimentos I, II e III ($Q = 2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

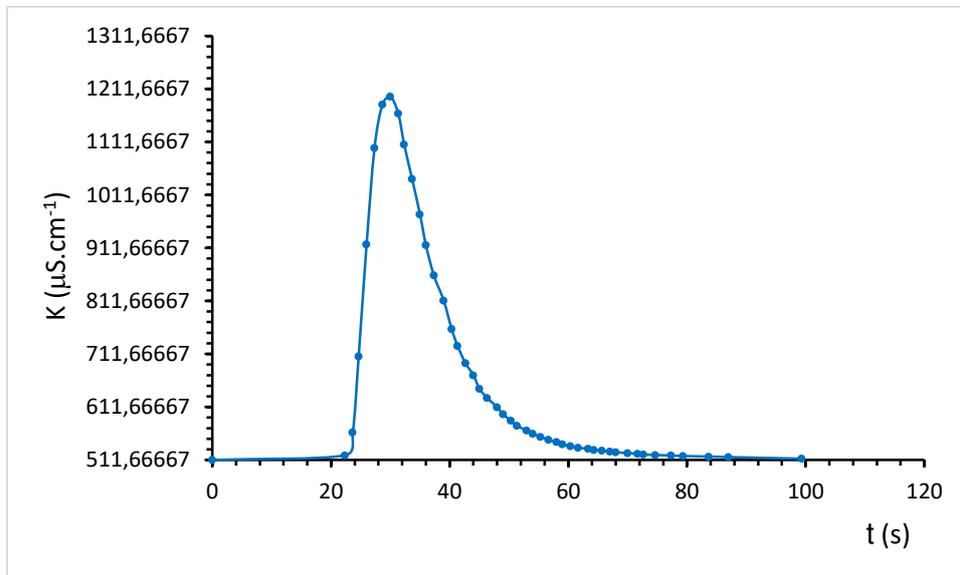


Tabela 4.7. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $k(t)$ em função do tempo ($Q = 2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

a	b	n	$h = \frac{(b-a)}{n}$	$f(a) + f(b)$	$2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i)$	Área
0	93,33	47	1,99	1025,67	61530,67	62110,45

Figura 4.2. Curva da distribuição do tempo de residência (DTR) ($Q = 2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

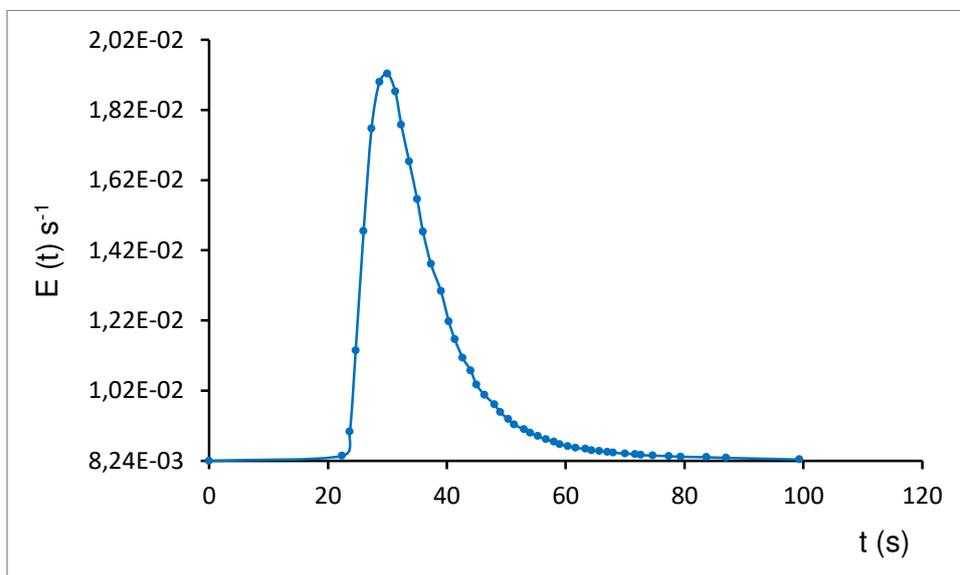


Figura 4.12. Perfil da curva do produto de $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

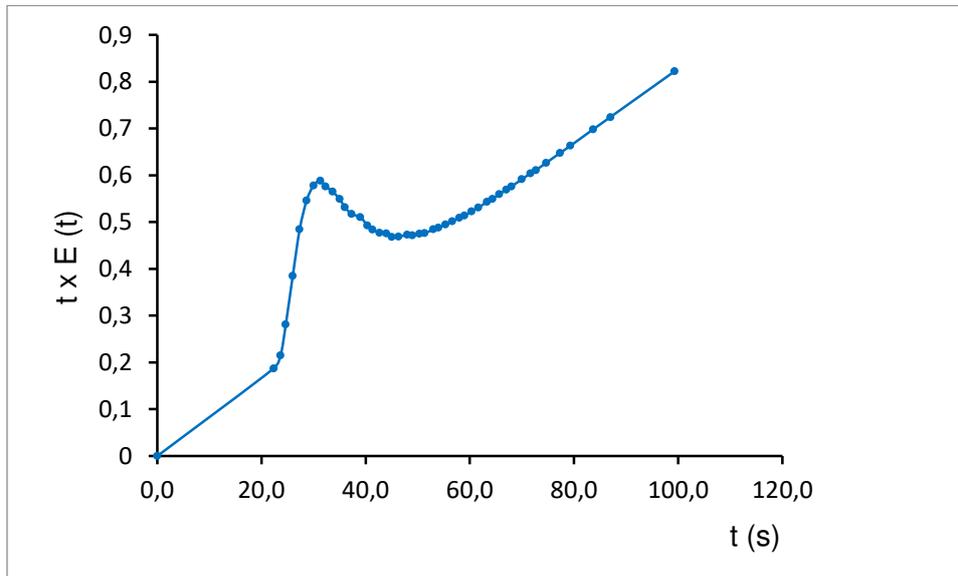


Tabela 4.8. Termos da regra dos trapézios múltiplos e área sob a curva $t \times E(t)$ em função do tempo ($Q = 2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)

a	b	n	$h = \frac{(b-a)}{n}$	$f(a) + f(b)$	$2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i)$	Área (t_m) (s)
0	93,33	47	1,99	0,82	46,57	46,8

Conforme mencionado no Capítulo III, referente aos materiais e métodos desenvolvidos, a seguir são apresentados os dados referentes aos experimentos realizados nas Etapas I e II, respectivamente.

Etapa I

4.2 Efeito da diferença de potencial elétrico em função do tempo médio de residência no reator para uma concentração de *E. coli* de $10^5 \text{ UFC}\cdot\text{mL}^{-1}$.

Nesse item são apresentados os dados obtidos das análises dos parâmetros físico-químicos, e das contagens de bactérias *E. coli* nas amostras de água de abastecimento do LABDES/UFMG, inicialmente na ordem de concentração de $5,0 \times 10^5 \text{ UFC}\cdot\text{mL}^{-1}$, e após ser submetida às diferenças de potenciais de 3,0, 5,0, 7,0 e 9,0 V.

No Capítulo III, foram mencionadas as vazões de operação do sistema para cada ddp. Entretanto, com a finalidade de caracterizar o escoamento da água pelo reator, e associar esse perfil à desinfecção de bactérias da mesma, nesse item serão

considerados os tempos médios de residência referentes a cada vazão, calculados no item 4.1 desse capítulo. Dessa forma, a seguir é apresentada a Tabela 4.9, referente aos dados de estudo da influência das diferenças de potenciais mencionadas associadas aos tempos médios de residência calculados, nos parâmetros físico-químicos e na desinfecção de bactérias da água.

Tabela 4.9. Dados dos parâmetros físico-químicos, condições eletroquímicas e de tempo médio de residência, bem como a contagem de *E. coli* em amostras de água antes de após a eletrólise no sistema.

ddp (V)	t _m (s)	k (mS.cm ⁻¹)	pH	T (NTU)	Cor (mgPtCo/L)	I (A)	j (mA.cm ⁻²)	<i>E. coli</i> (UFC.mL ⁻¹)	% Des.
0,0	0,00	2,19	7,39	2,16	10	0,00	0,00	500.000	0,00
3,0	46,80	2,18	7,45	1,58	10	1,31	5,08	400.000	20,00
3,0	65,40	2,18	7,49	1,68	10	1,30	5,10	400.000	20,00
3,0	82,20	2,18	7,5	1,72	10	1,28	5,10	400.000	20,00
3,0	121,8	2,19	8,04	4,53	25	1,28	5,10	100.000	80,00
0,0	0,00	2,19	7,81	1,99	15	0,00	0,00	500.000	0,00
5,0	46,80	2,18	7,96	2,00	10	2,16	8,57	200.000	60,00
5,0	65,40	2,17	7,98	2,13	15	2,14	8,49	200.000	60,00
5,0	82,20	2,18	8,02	2,43	15	2,10	8,33	100.000	80,00
5,0	121,8	2,16	8,45	3,97	20	2,07	8,21	800	99,84
0,0	0,00	2,23	7,94	1,77	10	0,00	0,00	500.000	0,00
7,0	46,80	2,23	8,10	1,89	10	2,73	10,83	300.000	40,00
7,0	65,40	2,24	8,07	2,04	10	2,70	10,71	300.000	40,00
7,0	82,20	2,23	8,17	3,13	20	2,66	10,56	200.000	60,00
7,0	121,8	2,21	8,36	4,98	30	2,62	10,40	3.000	99,40
0,0	0,00	2,33	7,51	2,25	10	0,00	0,00	500.000	0,00
9,0	46,80	2,33	7,63	2,62	10	3,05	12,10	300.000	40,00
9,0	65,40	2,33	7,67	2,29	10	3,00	11,91	300.000	40,00
9,0	82,20	2,34	7,99	2,29	10	2,97	11,79	100.000	80,00
9,0	121,8	2,31	8,03	2,76	10	2,93	11,63	100.000	80,00

Legenda: k: condutividade elétrica; T: turbidez; C: cor aparente do fluido; I: corrente elétrica; j: densidade de corrente elétrica; % Des.: porcentagem de desinfecção de *E. coli*.

4.2.1 Análises dos parâmetros físico – químicos

- *Condutividade elétrica*

Durante a realização dos experimentos a água da rede de abastecimento se encontrava com níveis de condutividade elétrica elevados, em conformidade com o nível de condutividade observado no laudo técnico referente à análise físico-química de uma amostra de água oriunda do abastecimento público local da cidade de Campina Grande, atestado pelo LABDES, apresentado no Apêndice A.

A condutividade elétrica da água de alimentação apresentou-se constante ao longo de todos os experimentos realizados com água da rede de abastecimento do LABDES/UFCG.

O reator operando sob uma dada ddp pode gerar incrustações de alguns componentes, como: carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, sulfato de magnésio, entre outros, nos eletrodos, todavia essa diferença não foi detectada, através da condutividade elétrica durante o período dos experimentos.

Liu et al. (2001) estudaram o processo de incrustação mista, através de bactérias *Pseudomonas fluorescens* e CaCO_3 , em diferentes superfícies de sistemas de água e considerando a velocidade e nível de saturação de CaCO_3 . O estudo comprovou que esse tipo de incrustação depende principalmente da afinidade das bactérias com um material. Sendo assim, a massa de incrustação mista desenvolveu-se mais facilmente em superfície polimérica, comparando com superfícies metálicas.

- *Análise de pH*

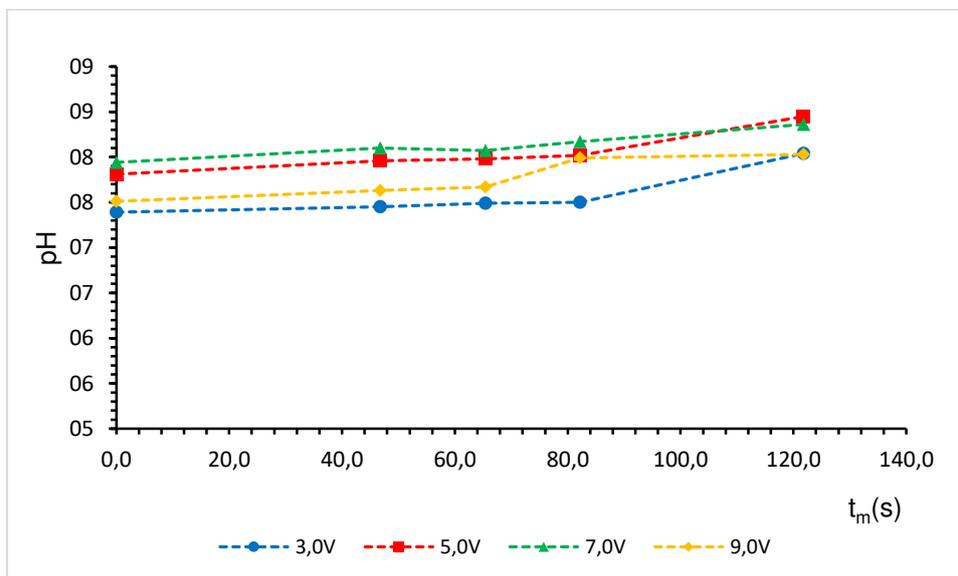
A Figura 4.13 mostra a variação do pH em função do tempo de residência no reator. Observou-se que o pH apresentou valores dentro de uma mesma faixa para todos os experimentos. Todavia, observou-se que houve um pequeno aumento de pH em função do tempo de residência. Esse aumento pode estar associado às mortalidades das bactérias durante os experimentos em função do tempo de residência, gerando assim uma matéria orgânica a partir do rompimento das células no meio aquoso.

Aswathy et al. (2016) observaram que o incremento de pH de águas residuais, nas faixas de pH entre 3 e 7, submetidas à eletrólise é atribuído ao aumento da

concentração de íons OH^- decorrente da redução das moléculas de água na superfície do cátodo. Em contrapartida, em faixas de pH próximas de 10, há uma tendência à redução desse valor após a eletrólise devido à oxidação de íons OH^- na superfície do ânodo.

Um outro parâmetro que pode influenciar no aumento do pH do meio aquoso é o aumento da alcalinidade próximo ao ânodo durante o processo eletrolítico. Segundo (Sivanantham e Shanmugam, 2017), pode ocorrer a oxidação parcial dos átomos de Ni na superfície da esponja.

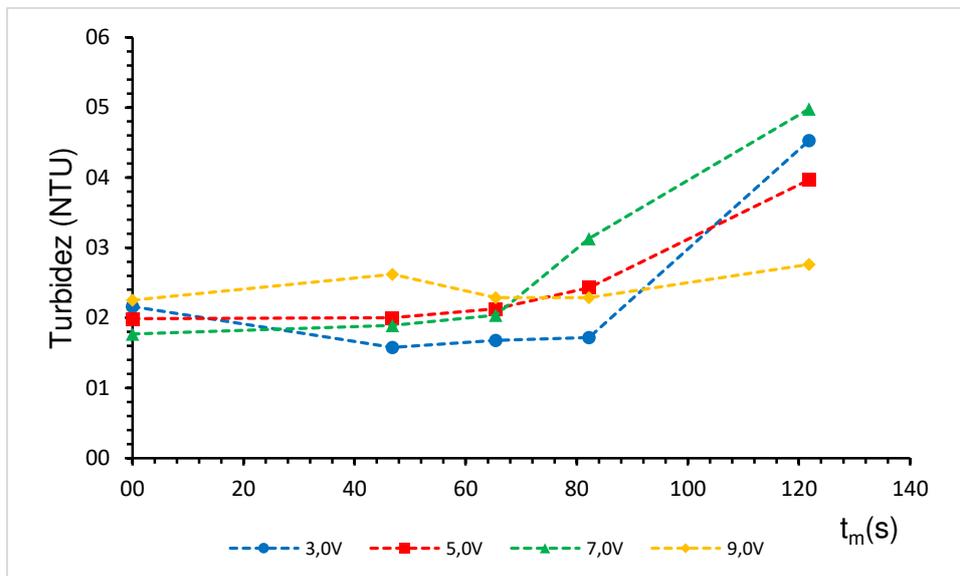
Figura 4.13. Variação do pH em função do tempo de residência do reator eletrolítico para as respectivas diferenças de potenciais



- *Turbidez*

A Figura 4.14 mostra o comportamento do parâmetro turbidez em função do tempo de residência para cada ddp aplicada durante tratamento da água no sistema eletrolítico.

Figura 4.14. Comportamento da turbidez em função dos tempos de residência para as respectivas diferenças de potenciais



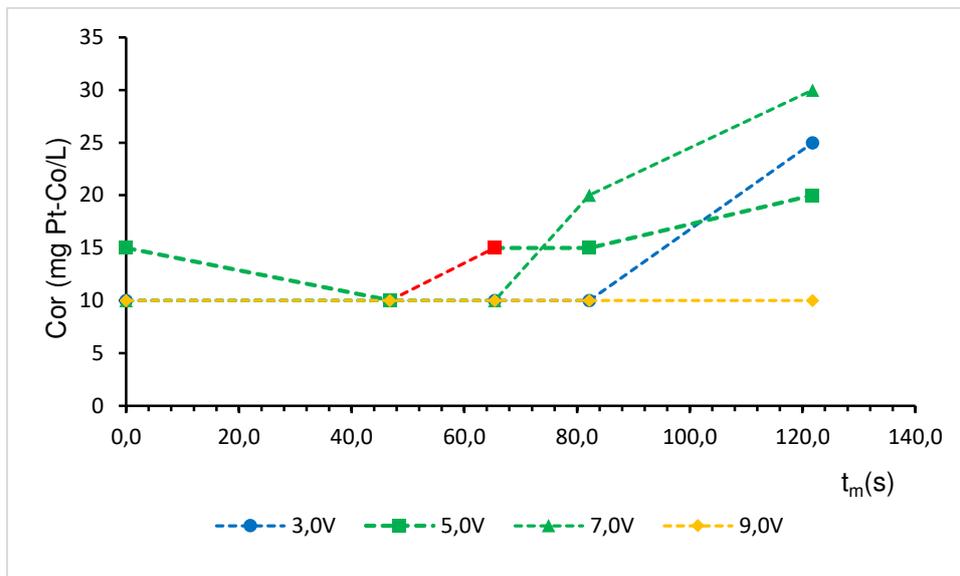
Para o parâmetro turbidez, verificou-se uma tendência de aumento quando o tempo médio de residência ultrapassou 80,0s. Isso pode ser explicado pelo fato do potencial elétrico associado ao maior tempo de eletrólise, gerar maior quantidade de células de bactérias mortas, e isso pode influenciar no aumento da turbidez no meio aquoso. Todavia, em nenhum caso estudado, seus valores ficaram acima do valor máximo permissível (5,0 NTU), da Portaria N° 2914/2011, do Ministério da Saúde.

- *Cor*

O comportamento da cor do meio aquoso, antes e após é fundamental ter sido estudado, por se tratar de um sistema que visa estudar águas de distribuição de redes públicas, as quais podem estar contaminadas a partir de vários fatores como: infiltrações de águas contaminadas, presença de matéria orgânica, etc. No caso em estudo por se tratar de água de abastecimento do LABDES/UFCG, água se encontrava na cisterna do prédio.

A Figura 4.15 mostra o comportamento do parâmetro cor em função dos tempos médios de residência estudados, para cada ddp considerada.

Figura 4.15. Comportamento da cor em função do tempo médio de residência para as respectivas diferenças de potenciais



Observa-se que nas diferenças de potenciais de 3,0V, 5,0V e 7,0V existem variações consideráveis ao longo do processo. Dessa forma, observa-se que:

- para 3,0V, a cor se mantém constante no valor de 10 mg Pt-Co/L, desde a água de alimentação até os tempos de residência de 46,8s, 65,4s e 82,2s, mas, aumenta para o valor de 25 mg Pt-Co/L no tempo de 121,8;
- em 5,0V a cor tem oscilação de valores, saindo de 15 mg Pt-Co/L na água de alimentação para 10 mg Pt-Co/L em 46,8s, voltando a 10 mg Pt-Co/L nos tempos de residência de 65,4 e 82,2s, e chegando ao valor máximo de 20 mg Pt-Co/L em 121,8s;
- na ddp de 7,0V, a cor se mantém em 10 mg Pt-Co/L, nos tempos de residência 46,8s e 65,4s, e posteriormente chega a 20 mg Pt-Co/L e 30 mg Pt-Co/L em 82,2s e 121,8s, respectivamente.

4.2.3 Análise de parâmetros eletroquímicos *versus* concentrações de *E.coli*

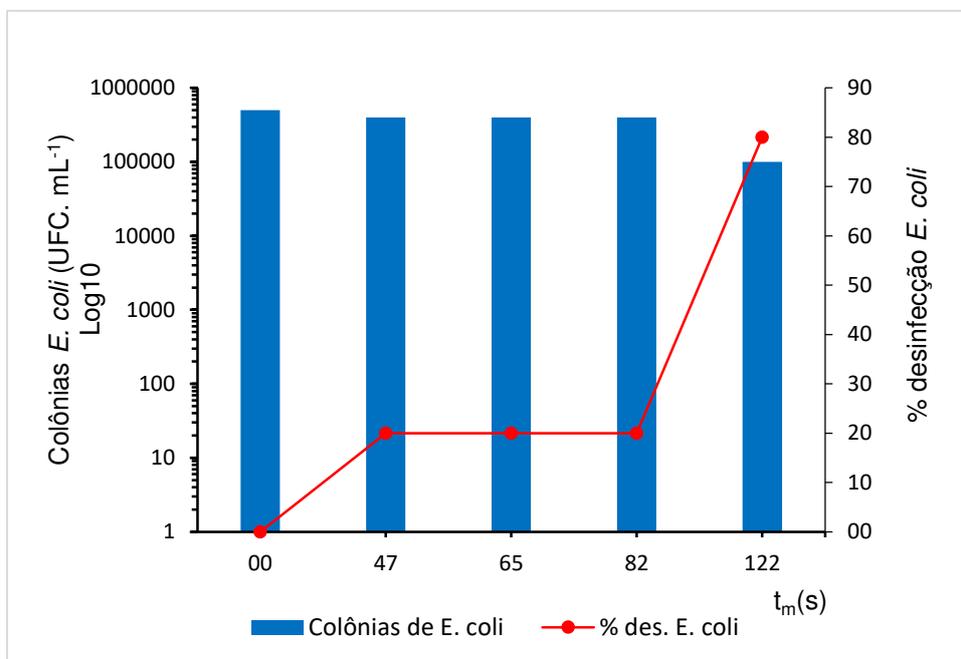
Considerando o sistema eletrolítico em estudo opera com água de abastecimento público, que de certa forma possui concentração iônica, haverá uma

movilidade iônica dos respectivos cátions e ânions para os respectivos eletrodos, formando assim uma densidade de corrente no interior do reator (Chen, 2004).

Nessa fase de análises, procurou-se associar os potenciais elétricos aplicados aos respectivos tempos médios de residência, visando estudar o efeito dessas diferenças de potenciais e dos tempos de residência na desinfecção de *E. coli* da água.

A partir da Figura 4.16, inicia-se o estudo do perfil de desinfecção em função dos fatores ddp e tempo médio de residência.

Figura 4.16. Comportamento da variação da concentração de *E. coli* e o percentual de desinfecção em função do tempo de residência na ddp = 3,0V

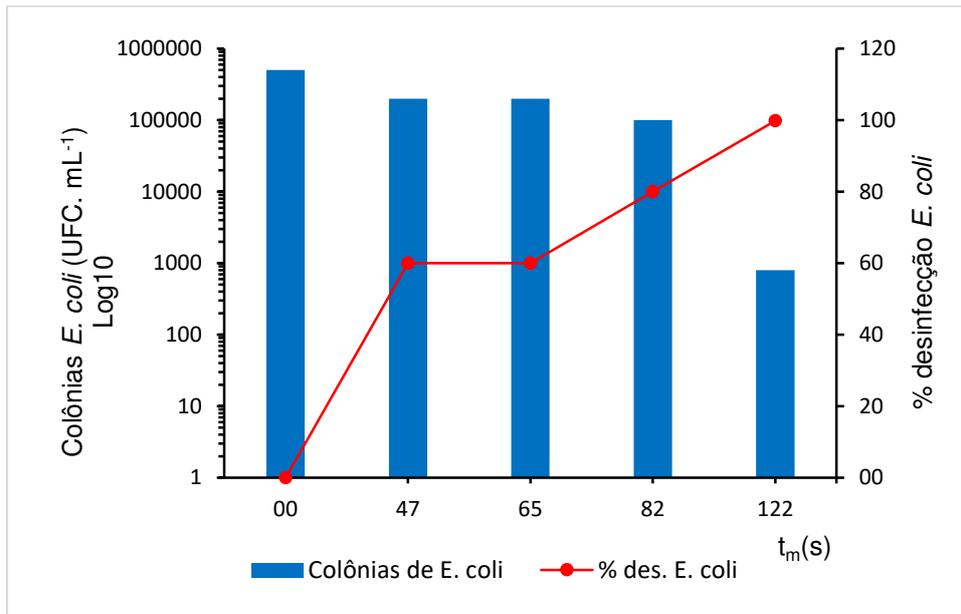


Nos tempos de residência de 46,8; 65,4s e 82,2s, a porcentagem de desinfecção de bactérias apresenta o mesmo valor de 20,0%. Em contrapartida, a água submetida ao tempo de residência de 121,8s no reator apresentou uma diminuição significativa no número de colônias de bactérias, chegando à porcentagem de desinfecção de 80,0%.

A Figura 4.17, que trata da aplicação da ddp de 5,0 V, mostra uma diminuição mais significativa no número de colônias de *E. coli*, conforme foi aumentado o tempo de residência da água no reator eletrolítico. Nos tempos de residência de 46,8s e 65,4s, a porcentagem de desinfecção é de 60,0%, apresentando um aumento de

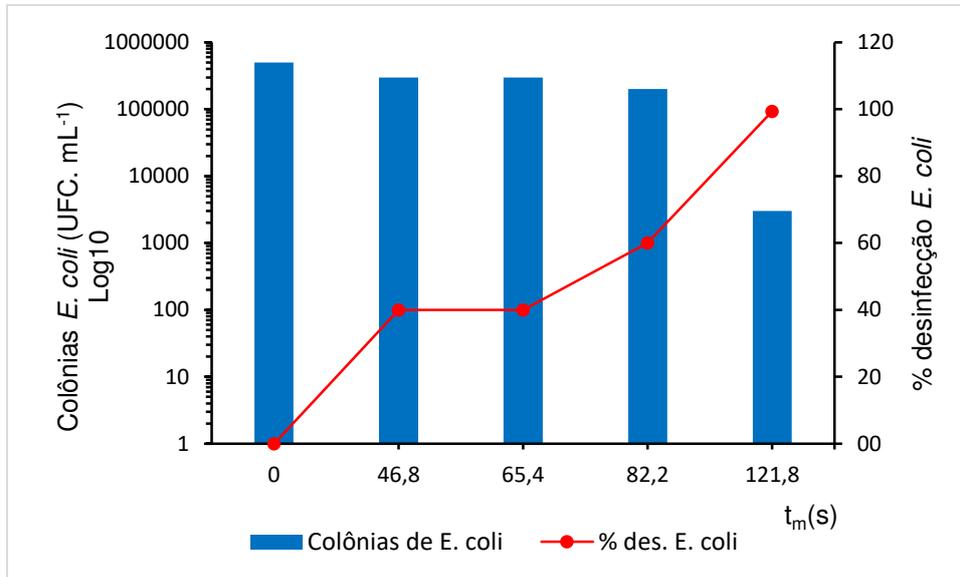
40,0% em relação aos mesmos tempos de residência aplicados na diferença de potencial de 3,0V. Em 82,2s, a porcentagem de desinfecção aumenta em 60,0%, chegando a 99,84% no tempo de 121,8s, enquanto que em 3,0V, nessa mesma condição, a porcentagem chegou à 80,0%.

Figura 4.17. Variação de colônias de *E. coli* e porcentagem de desinfecção com o tempo de residência na ddp = 5,0V



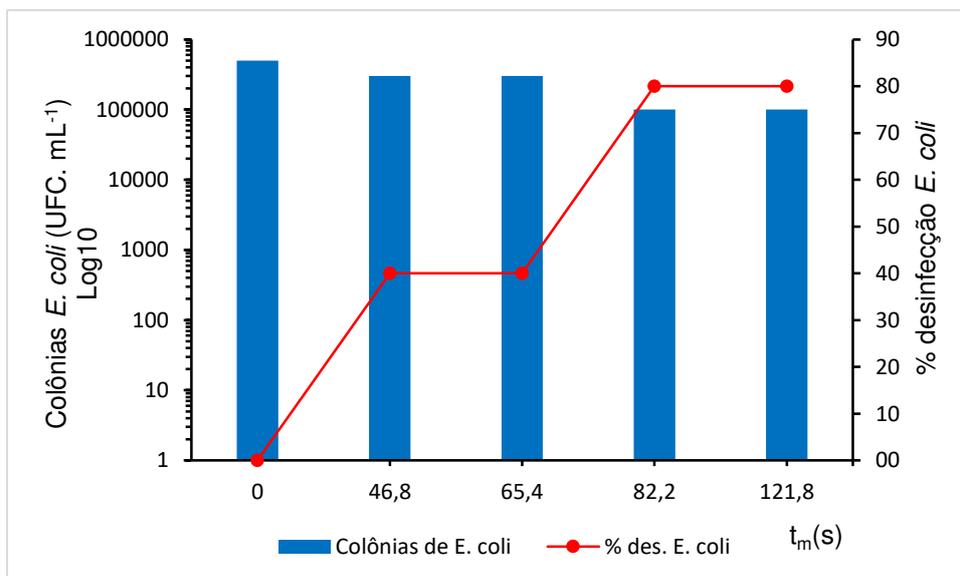
A diferença de potencial de 7,0V produz densidades de corrente elétrica entre 10,0 e 11,00 mA.cm⁻², conforme mostra a Tabela 4.9. Nessas condições, observou-se que para os tempos de residência de 46,8 e 65,4s, a porcentagem de desinfecção de *E. coli* na água foi de 40,0%, enquanto que para 82,2s e 121,8s esses valores foram de 60,0% e 99,4%, respectivamente. Nesse caso, pode-se considerar que existe uma semelhança na diminuição de colônias de *E. coli* para as os tempos de residência 82,2 e 121,8s entre as diferenças de potenciais de 5,0V e 7,0V, enquanto que para 46,8s e 65,4s há uma diminuição de 20,0% na porcentagem de desinfecção para ddp de 7,0V. Através da Figura 4.18, observa-se a representação desse comportamento.

Figura 4.18. Variação de colônias de *E. coli* e porcentagem de desinfecção com o tempo de residência na ddp = 7,0V



A Figura 4.19 mostra que, na ddp de 9,0V, na qual se produz densidades de corrente acima de 11,0 mA.cm⁻², não se chegou à porcentagens elevadas de desinfecção de *E. coli* na água. Em 46,8s e 65,4s foi mantido o mesmo valor de 40,0% apresentado na ddp de 7,0V, e para os tempos de residência de 82,2s e 121,8s a porcentagem só chegou à 80,0%. Era de se esperar que o percentual atingisse o valor próximo a 100% para o tempo de residência para 121,8s.

Figura 4.19. Variação de colônias de *E. coli* e porcentagem de desinfecção com o tempo de residência na ddp = 9,0V



De forma geral, para o maior tempo médio de residência, foram observadas maiores porcentagens de desinfecção de bactérias da água.

Nakajima et al., (2004) avaliaram a viabilidade de diferentes tipos de bactérias em função de densidades de corrente, característica de uma diferença de potencial aplicada, e o tempo de eletrólise. Nesse estudo, uma faixa de densidade de corrente foi testada, e então foi observado um tempo mínimo para desinfecção das bactérias.

Etapa II

Nessa etapa foi explorado o desempenho do sistema eletrolítico sob diferentes ddp para um tempo de residência constante, para os seguintes meios aquosos com e sem *E.coli*;

- água deionizada,
- solução de cloreto de sódio e
- água de abastecimento público local.

Visando fazer um estudo comparativo do efeito da diferença de potencial aplicada para cada meio, no sentido de observar os gradientes de desinfecção bacteriológicas nos respectivos meios aquosos.

4.3 Água deionizada

As Tabelas 4.10 e 4.11 apresentam os dados em triplicata para cada parâmetro em água deionizada sem e com a presença de *E. coli*, respectivamente, de acordo as características físico-químicas apresentadas.

Tabela 4.10. Parâmetros físico-químicos e de operação do sistema eletrolítico para a água deionizada sem *E. coli*

ddp (V)	I (A)	j (mA. cm ⁻²)	k (μS.cm ⁻¹)	pH	T (NTU)	Cor (uH)	Cl ⁻ (mg.L ⁻¹)
0,0	0,00	0,00	7,00	6,57	0,8	0	16,31
5,0	0,07	0,28	11,77	7,59	0,8	0	21,51
10,0	0,13	0,51	10,83	8,08	1,1	0	22,69
15,0	0,23	0,91	11,34	8,21	1,1	0	22,45
20,0	0,30	1,18	12,76	8,22	1,0	0	24,11
25,0	0,42	1,66	11,46	8,29	0,9	0	24,82
30,0	0,50	1,97	11,22	8,30	1,1	0	26,23

Tabela 4.11. Parâmetros físico-químicos; de operação do sistema eletrolítico e bacteriológicos para a água deionizada com *E. coli*

ddp (V)	I (A)	j (mA. cm ⁻²)	k (μS.cm ⁻¹)	pH	T (NTU)	C (uH)	Cl ⁻ (mg.L ⁻¹)	<i>E. coli</i> (UFC.mL ⁻¹)
0,0	0,0	0,00	7,11	6,55	0,84	0	19,85	3000
5,0	0,05	0,20	7,69	6,65	0,76	0	21,74	1133
10,0	0,12	0,47	8,73	6,82	0,69	0	21,98	970
15,0	0,21	0,83	9,62	7,05	0,63	0	22,69	933
20,0	0,32	1,26	9,88	7,08	0,62	0	24,11	877
25,0	0,4	1,58	11,55	7,31	0,46	0	24,82	803
30,0	0,47	1,86	11,02	8,2	0,37	0	26,00	767

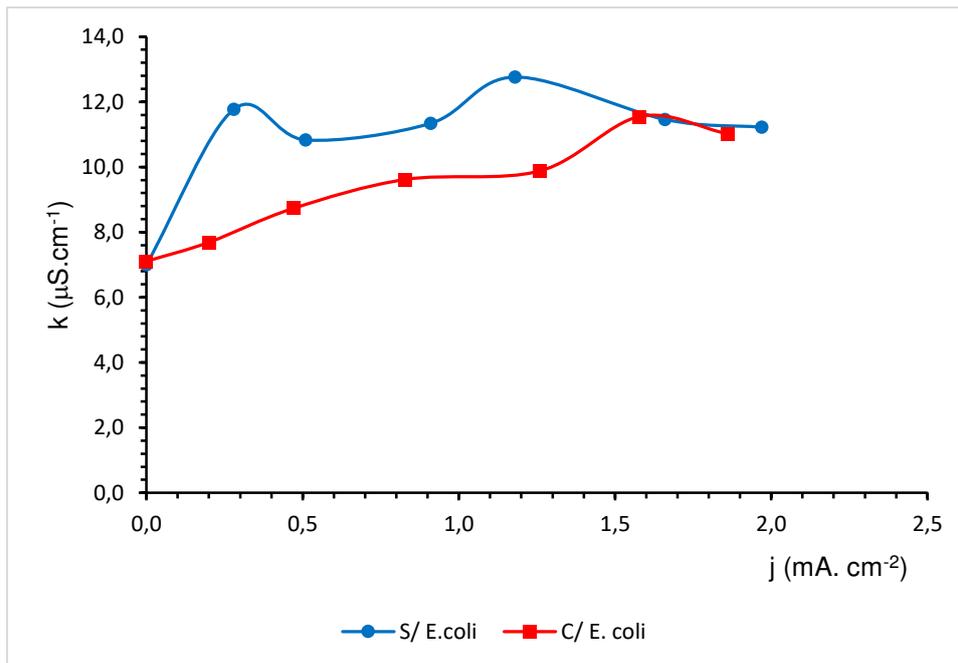
Para a água deionizada, observa-se que a faixa de diferença de potencial a qual o sistema operou pôde ser fixada em intervalos de 5,0V (a partir desse mesmo valor) até chegar ao valor máximo de 30,0V. Devido a água deionizada apresentar condutividade elétrica na faixa de 7,0 μS.cm⁻¹, tanto sem quanto com a presença de *E. coli*, a passagem de corrente elétrica é dificultada. Portanto, na ddp máxima de 30,0V, o máximo de corrente elétrica obtida foi de 0,5 e 0,47 A para água deionizada sem e com *E. coli*, respectivamente. Sendo assim, para o sistema de área superficial do anodo (esponja de Níquel) de 251,3 cm², as densidades de corrente máximas obtidas foram de 1,97 e 1,86 mA.cm⁻², para as respectivas condições da água já mencionadas.

A seguir são apresentados o estudo comparativo entre a água deionizada sem e com *E. coli*, considerando-se o comportamento de cada parâmetro medido em relação às variações de densidades de corrente.

4.3.1 Condutividade elétrica (k)

A variação de condutividade elétrica em função das densidades de corrente encontradas para a água deionizada sem e com *E. coli* é apresentada na Figura 4.20.

Figura 4.20. Estudo comparativo da condutividade elétrica em função da variação de densidade de corrente elétrica entre a água deionizada sem e com *E. coli*



A Figura 4.20 indica que a condutividade elétrica da água deionizada sem *E. coli* (curva de dispersão azul), uma variação de 3,77 (para mais) em relação ao valor inicial de $7,0 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Dessa variação considerável inicial, o parâmetro se mantém praticamente constante ao longo das variações de densidade de corrente. Em contrapartida, a água deionizada com *E. coli* apresentou variação crescente, e de forma gradativa, embora que, em se tratando desse parâmetro, isso não tenha ocorrido de forma considerável.

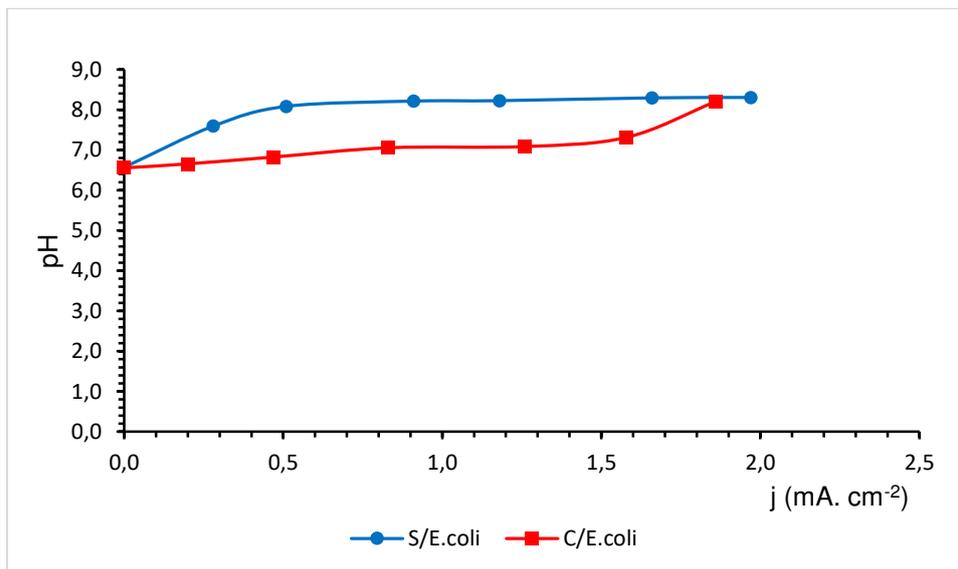
Em geral, deve distinguir-se entre os arranjos para desinfecção da água em um regime de fluxo contínuo e para matar microrganismos natural ou artificialmente aderidos às superfícies (tratamento de biofilmes por polarização da superfície). Por exemplo, um reator cilíndrico, feito por enrolamento concêntrico de duas folhas de pano de carbono separadas por duas membranas de permuta iônica, foi utilizado para testar a esterilização da água potável (Matsunaga et al., 1992; Henquín et al., 2013),

onde a desinfecção eletroquímica foi atribuída à oxidação direta da coenzima intracelular e não à geração eletroquímica de desinfetantes.

4.3.2. pH

Em se tratando do pH, tem-se a Figura 4.21, que compara os valores do pH em função da variação de densidade de corrente elétrica, para a água deionizada sem e com *E. coli*.

Figura 4.21. Estudo comparativo do pH em função da variação de densidade de corrente elétrica entre a água deionizada sem e com *E. coli*



Tanto para a água sem *E. coli*, quanto para a água com *E. coli*, o pH parte de valores em torno de 6,5. Ao se aplicar a ddp, obtendo-se as densidades de corrente, percebe-se um incremento considerável desse pH, sendo mais expressivo no caso da água sem *E. coli*. Entretanto, esse incremento se mantém dentro de uma faixa de valores semelhantes ao longo dos experimentos, como é observado nas curvas de dispersão.

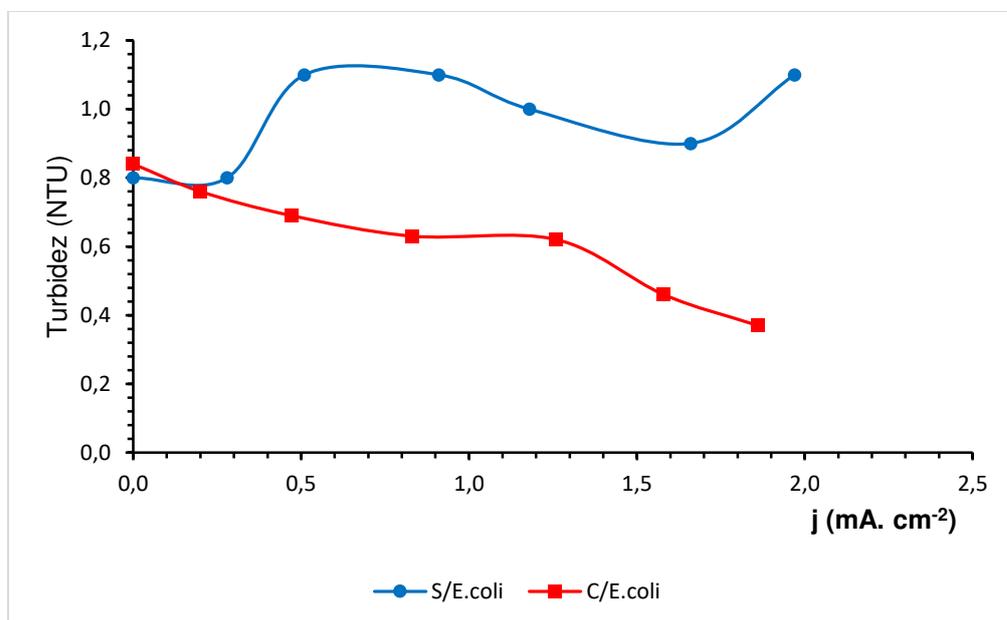
Li et al., (2010) observaram que em soluções contaminadas com nitrato, as tendências para a redução eletroquímica desse componente foram similares em diferentes pHs iniciais. Sendo assim, partindo-se dos pHs iniciais de 3,0, 5,0, 7,0, 9,0 e 11,0, estes aumentaram na faixa de 11,2 - 11,3 em 3 horas de reação eletrolítica. Essa variação se deve, principalmente, às reações que formam íons hidroxila e nitrogênio durante a redução eletroquímica de nitrato. Os incrementos no valor final

do pH sugerem que a produção de íons H^+ não corresponde à produção dos íons OH^- .

4.3.3 Turbidez (NTU)

O comportamento do parâmetro turbidez em função da variação de densidade de corrente para a água deionizada sem e com *E. coli* é apresentado na Figura 4.22 (Körbahti & Tanyolac, 2009).

Figura 4.22. Estudo comparativo da Turbidez em função da variação de densidade de corrente elétrica entre a água deionizada sem e com *E. coli*



Partindo-se dos valores iniciais de turbidez de 0,8 e 0,84 NTU para as águas deionizadas sem e com *E. coli*, respectivamente, observa-se que, no primeiro caso, há uma tendência de oscilação dos valores de turbidez, ora diminuindo, ora aumentando ao longo das variações de densidade de corrente elétrica, embora que esses valores estejam dentro de uma faixa muito próxima. Já no segundo caso, há um decréscimo de turbidez, embora pouco expressivo, conforme as densidades de corrente elétrica aumentam.

Körbahti & Tanyolac (2009), avaliaram o tratamento de águas industriais têxteis em um reator contínuo tubular. Os valores de turbidez ao longo do tempo de eletrólise flutuaram de forma considerável, devido à possível formação de subprodutos complexos e intermediários. Além disso, o próprio efeito da distribuição do tempo de residência também pode ser elemento causador dessa flutuação.

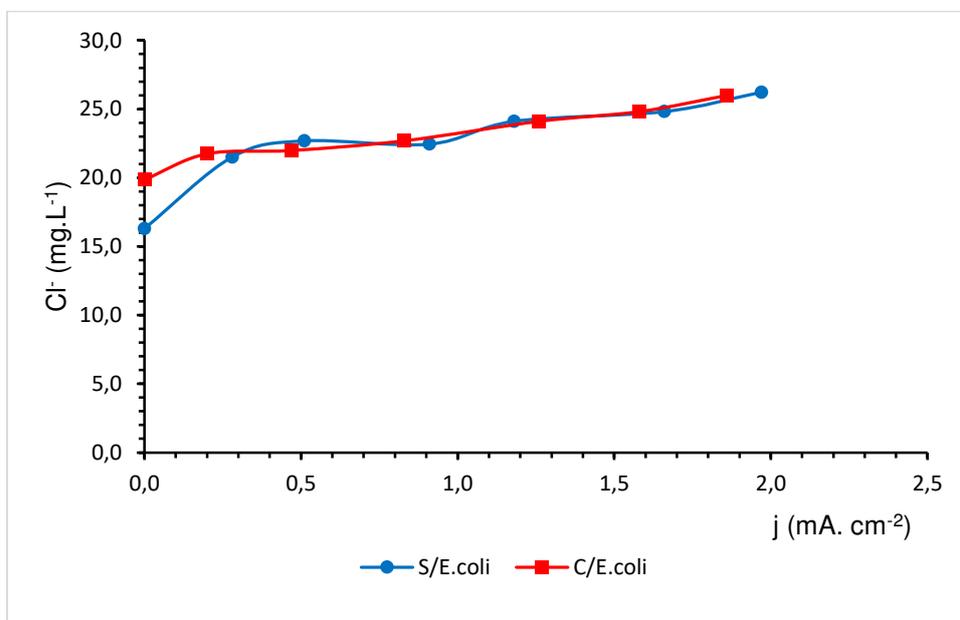
Zhao et al., (2014), estudando a remoção de turbidez de uma água de pré-tratamento por eletrocoagulação, constataram que a eficiência dessa remoção aumentava a medida que o pH inicial da água era incrementado para níveis alcalinos, e também observaram que quando o pH subiu do nível ácido para neutro, os poluentes apresentaram redução acentuada.

Como já foi observado, os pH's iniciais dos meios encontravam-se pouco abaixo do pH neutro, aumentando para neutros e alcalinos, mesmo que de forma pouco significativa, conforme foi aumentada a densidade de corrente elétrica durante a eletrólise.

4.3.4 Cloreto (mg.L^{-1})

Em relação às concentrações de cloreto para as águas deionizadas sem e com *E. coli*, submetidas ao tratamento eletrolítico, tem-se o estudo comparativo apresentado na Figura 4.23.

Figura 4.23. Estudo comparativo da concentração de Cl^- em função da variação de densidade de corrente elétrica entre a água deionizada sem e com *E. coli*



Observando-se a Figura 4.23, percebe-se que há uma tendência de oscilação de concentração de íons cloreto, ora aumentando, ora diminuindo em relação ao valor inicial ($\text{Cl}^- = 16,31 \text{ mg.L}^{-1}$), no processo de eletrólise da água deionizada sem *E. coli*,

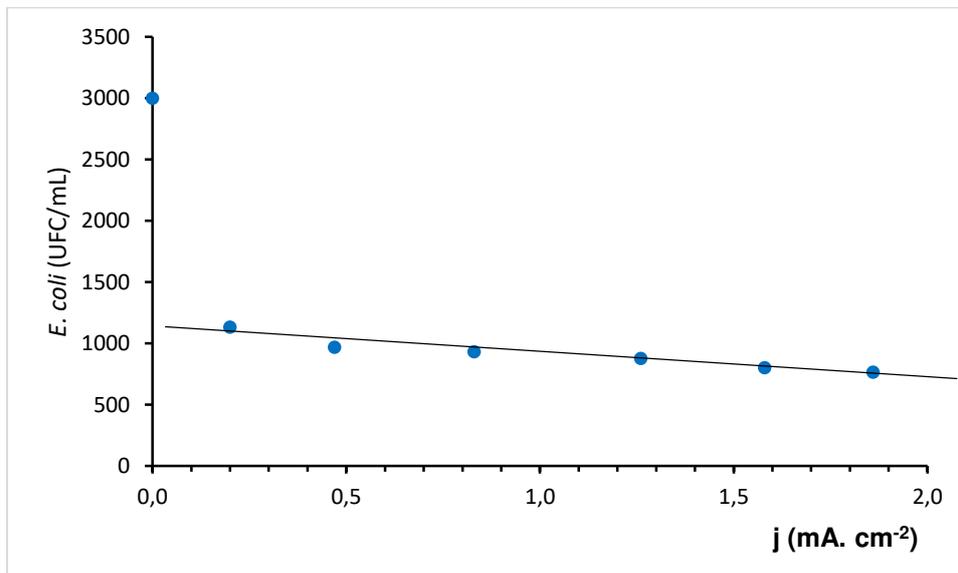
conforme é aumentada a densidade de corrente elétrica. Entretanto, para a água com a presença de *E. coli*, a qual apresentou concentração inicial de cloreto de $19,85 \text{ mg.L}^{-1}$, há um acréscimo gradativo de íons cloreto.

Rajab et al., (2015) estudaram a formação de cloro residual na água utilizando eletrodo de diamante dopado com Boro, partindo-se de concentrações iniciais variáveis de cloreto, e constataram que a maior formação de cloro livre estaria relacionada à maiores concentrações de cloreto iniciais.

4.3.5 *E. coli* (UFC.mL^{-1})

A Figura 4.24 mostra a variação da concentração de *E. coli* na água com o aumento da densidade de corrente elétrica para a água deionizada de concentração inicial de *E. coli* de $3 \times 10^3 \text{ UFC.mL}^{-1}$.

Figura 4.24. Estudo da concentração de *E. coli* em função da densidade de corrente elétrica para a água deionizada



Da Figura 4.24, observa-se que ao iniciar a reação eletrolítica, na densidade de corrente de $0,2 \text{ mA.cm}^{-2}$, a concentração de *E. coli* permanece na mesma ordem de 10^3 UFC.mL^{-1} . Em torno de $0,5 \text{ mA.cm}^{-2}$, essa concentração começa a decrescer gradativamente para ordens de 10^2 UFC.mL^{-1} , até que seu valor mínimo seja alcançado na densidade de corrente de $1,86 \text{ mA.cm}^{-2}$, chegando ao número de

colônias de *E. coli* de $7,67 \times 10^2$ UFC.mL⁻¹, que corresponde a uma porcentagem de desinfecção de 74,44%.

A condutividade da solução é um fator importante que afeta diretamente a eficiência e consumo de energia da célula eletrolítica. Dessa forma, quanto maior a condutividade, menor o consumo de energia e mais eficiente é a remoção de poluentes (Vukusic et. al., 2016).

Gomez-López, Gil & Allende (2017) avaliaram a eficácia de células eletrolíticas capazes de gerar maior concentração de espécies reativas de oxigênio usando baixas concentrações de sais. Os resultados indicaram que o sistema de eletrólise combinado com a adição mínima de NaCl (0,05%) foi capaz de suprimir a acumulação de *E. coli*.

4.4 Solução de NaCl

Da mesma forma que foi realizado com a água deionizada, foram determinados os parâmetros referentes à solução de NaCl com uma condutividade elétrica nos níveis da água de abastecimento público, na faixa de 800 $\mu\text{S.cm}^{-1}$. A solução de NaCl, possibilitou o melhoramento da sua contribuição iônica no transporte de corrente elétrica. O reator eletrolítico então foi caracterizado nessas condições.

A condutividade elétrica bem acima dos níveis da água deionizada corroborou para uma diminuição na faixa de diferenças de potenciais aplicadas, já que as variações de corrente foram mais significativas entre uma ddp e outra, devido a resistência à passagem de corrente elétrica na solução de NaCl ser menor. Em contrapartida, os valores máximos de ddp alcançados pelo sistema foram de 13,0 e 10,0V, para as águas sem e com *E. coli*, respectivamente, até onde não se observou curto-circuito no mesmo.

Dessa forma, tem-se as Tabelas 4.12 e 4.13 para a água sem e com a presença de *E. coli* nas condições iniciais especificadas a seguir.

Tabela 4.12. Parâmetros físico-químicos e de operação do sistema eletrolítico para a solução de NaCl sem *E. coli*

ddp (V)	I (A)	j (mA. cm ⁻²)	k (μS.cm ⁻¹)	pH	T (NTU)	C (uH)	Cl ⁻ (mg.L ⁻¹)
0,0	0,00	0,00	793	6,57	1,0	0	268,71
2,0	0,30	1,19	804	9,31	1,7	0	263,98
3,0	0,61	2,41	801	9,09	2,5	0	265,41
4,0	0,84	3,32	803	9,58	3,8	0	266,11
5,0	1,06	4,19	815	9,71	4,5	0	268,48
6,0	1,33	5,25	814	9,30	4,3	0	265,17
7,0	1,46	5,77	810	9,52	4,1	0	266,35
8,0	1,74	6,87	816	9,63	4,5	0	263,75
9,0	1,97	7,78	806	9,38	5,4	3	265,88
10,0	2,23	8,81	808	8,87	6,3	6	265,40
11,0	2,53	9,99	807	8,63	5,9	6	267,53
12,0	2,75	10,86	809	8,40	5,8	6	270,60
13,0	2,98	11,77	803	8,64	8,5	13	274,38

Tabela 4.13. Parâmetros físico-químicos, de operação do sistema eletrolítico e contagem de *E. coli* para a solução de NaCl com *E. coli*

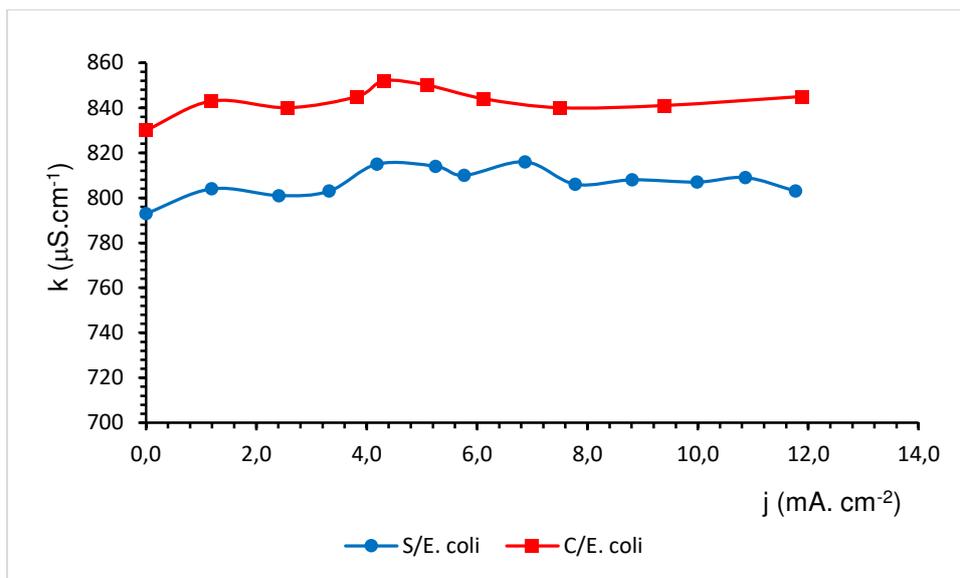
ddp (V)	I (A)	j (mA. cm ⁻²)	k (μS.cm ⁻¹)	pH	T (NTU)	C (uH)	Cl ⁻ (mg.L ⁻¹)	<i>E. coli</i> (UFC.mL ⁻¹)
0,0	0,0	0,00	830	7,03	0,46	0	310,54	1000
2,0	0,3	1,19	843	7,76	0,38	0	304,87	327
3,0	0,65	2,57	840	7,91	3,70	0	306,05	223
4,0	0,97	3,83	845	8,26	5,10	0	308,65	203
5,0	1,09	4,31	852	9,67	4,50	0	307,94	160
6,0	1,29	5,10	850	9,30	4,30	0	303,22	127
7,0	1,55	6,12	844	9,52	4,10	0	304,63	100
8,0	1,90	7,51	840	9,63	4,50	0	306,19	57
9,0	2,38	9,40	841	9,38	5,40	3	305,82	0
10,0	3,01	11,89	845	8,87	6,30	6	302,27	0

No tratamento eletrolítico das soluções de NaCl sem e com a presença de *E. coli*, também foi analisado o comportamento dos parâmetros físico-químicos, de operação e bacteriológico (solução com *E. coli*), em função das densidades de corrente obtidas com as ddp's aplicadas. Cada parâmetro é analisado separadamente a seguir.

4.4.1 Condutividade elétrica (k)

O estudo comparativo da condutividade elétrica entre as soluções de NaCl, sem e com *E. coli*, em função da densidade de corrente é apresentado na Figura 4.25.

Figura 4.25. Estudo comparativo da condutividade elétrica em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as soluções de NaCl sem e com *E. coli*



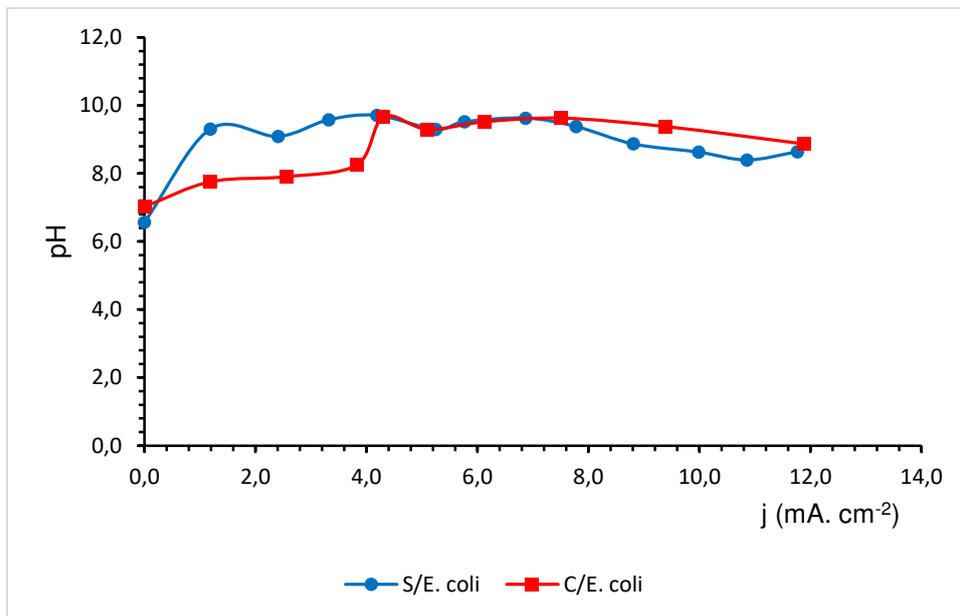
Observadas as Tabelas 4.12 e 4.13, nota-se que, de maneira semelhante à água deionizada, o efeito do aumento da densidade de corrente é de um incremento inicial na condutividade elétrica das soluções de NaCl sem e com *E. coli* em relação às condições dessas águas antes do tratamento eletrolítico.

A Figura 4.25 indica que, após o incremento de condutividade elétrica inicial, essa se mantém dentro das mesmas faixas de valores.

4.4.2 pH

Para o parâmetro pH, observa-se o comportamento desse parâmetro em relação à densidade de corrente na Figura 4.26.

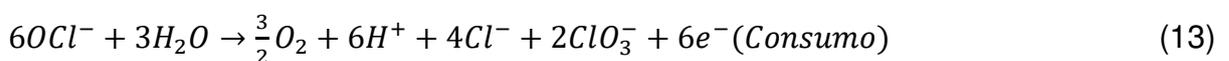
Figura 4.26. Estudo comparativo do pH em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as soluções de NaCl sem e com *E. coli*.



Partindo-se do valor inicial de pH para a água sem *E. coli* inferior a 7,0, a partir da aplicação crescente de ddp, refletida no aumento gradativo da densidade de corrente elétrica do sistema, há o incremento considerável desse parâmetro, mantida uma faixa semelhante ao longo do processo eletrolítico até a ddp de 13,0 V. O maior valor de pH (9,71) é destacado na densidade de corrente de 4,19 mA.cm⁻², correspondente à ddp de 5,0V.

Para a água com *E. coli*, cujo pH inicial foi de 7,03, também há o efeito de incremento, especialmente na densidade de corrente de 4,31 mA.cm⁻², também correspondente à ddp de 5,0V, onde o pH chegou a 9,67.

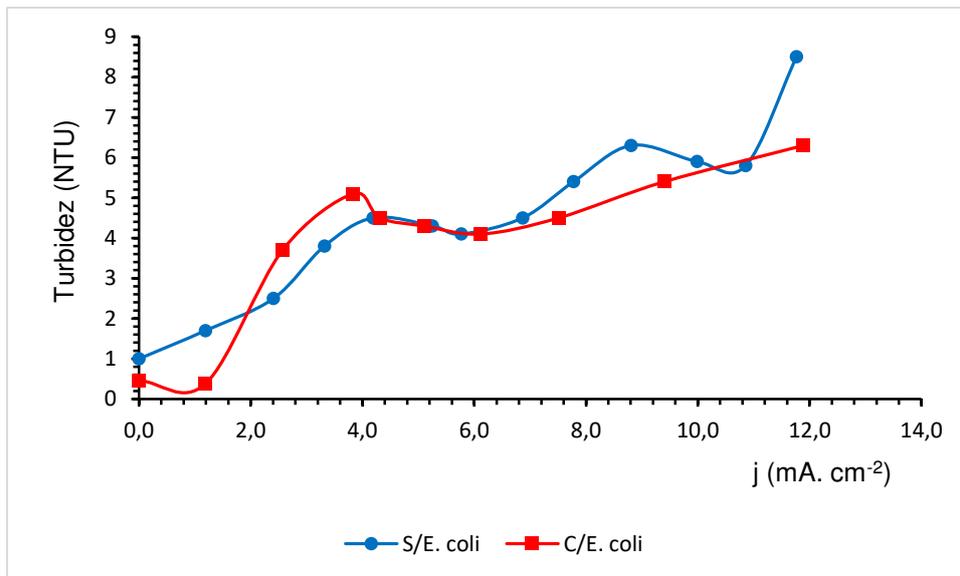
Körbahti & Tanyolac (2009) atribuíram o aumento de pH em eletrólitos com a presença de NaCl, à reação de hidrólise do Cl₂ descarregado no anodo, produzindo-se ácido hipocloroso (HOCl), que é ionizado em íons H⁺ e hipoclorito (OCl⁻), onde este último é consumido. As Equações (11), (12) e (13) mostram as respectivas reações.



4.4.3 Turbidez (NTU)

A turbidez varia conforme se observa na Figura 4.27 a seguir:

Figura 4.27. Estudo comparativo da Turbidez em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as soluções de NaCl sem e com *E. coli*



De maneira análoga à água deionizada, o comportamento da turbidez em função das densidades de corrente aplicadas às soluções de NaCl apresenta um perfil de flutuação em seus valores. Entretanto, foi observado nas duas curvas de dispersão que o parâmetro tem uma tendência predominantemente crescente, especialmente para a solução sem *E. coli*.

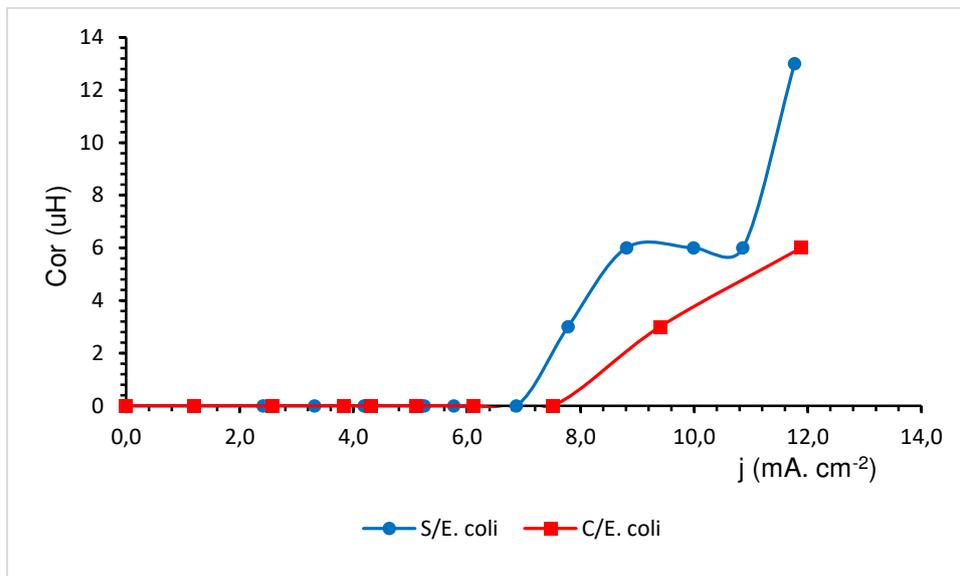
Pauli et al., (2017), investigando a remoção de matéria orgânica de resíduos de lixiviado, relacionando os fatores pH, densidade de corrente, e o tempo de eletrólise, chegaram a reduções de cor e turbidez acima de 90%.

Silva et al., (2016) observaram o efeito da coagulação associada à eletrólise nos parâmetros cor e turbidez em águas residuais de fabricação de tintas, e constataram a diminuição dos níveis após o tratamento.

4.4.4 Cor (uH)

As soluções de NaCl com e sem *E. coli* apresentam para o parâmetro cor o comportamento ilustrado na Figura 4.28.

Figura 4.28. Estudo comparativo da Cor em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as soluções de NaCl sem e com *E. coli*



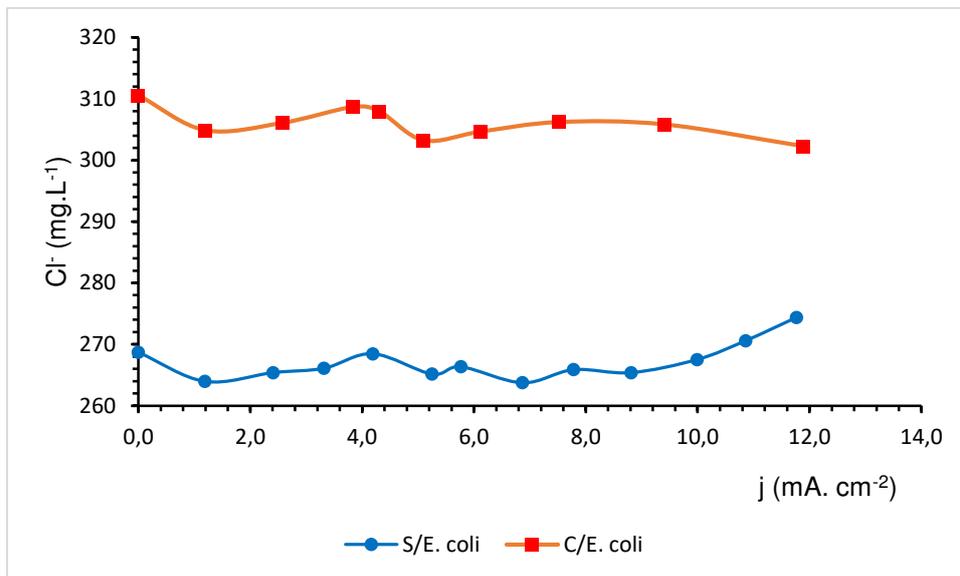
Analisando-se a Figura 4.28, observou-se que nas soluções de NaCl sem e com *E. coli*, há um aumento de cor a partir das densidades de corrente de 7,78 e 9,4 mA.cm⁻², respectivamente, saindo de 0 para 3 uH. Os valores máximos foram obtidos na densidade de corrente em torno de 12,0 mA.cm⁻², sendo de 13 Hz para a solução sem *E. coli* e 6 Hz para a solução com *E. coli*. O efeito do aumento de cor foi menor no caso da água com *E. coli*.

Sampaio (2016) relatou aumentos consideráveis de turbidez e cor após tratamento de água pelo processo eletrolítico utilizando eletrodos de ferro. O fato foi explicado por uma provável liberação de íons ferros (Fe²⁺) pelos eletrodos, e por estes terem sido oxidados (Fe³⁺) pelo processo eletrolítico, exercendo forte atração à superfície de coloides, carregados negativamente, diminuindo as forças de repulsão eletrostática e permitindo a agregação das partículas e formação de coágulos e flocos, potencializando ações de coagulação na água.

4.4.5 Cloreto (mg.L⁻¹)

As variações de concentração de cloreto em função das densidades de corrente aplicadas às soluções de NaCl, são apresentadas na Figura 4.29.

Figura 4.29. Estudo comparativo dos teores de Cloreto em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as soluções de NaCl sem e com *E. coli*



Partindo-se das concentrações iniciais de íons cloreto de 268,71 e 310,54 mg.L^{-1} para as soluções de NaCl sem e com *E. coli*, respectivamente, observou-se uma discreta flutuação de valores conforme foram aumentadas as densidades de corrente sobre o sistema.

Para a Solução de NaCl sem *E. coli*, foram destacados pontos de consumo e geração de cloro ativo. Na densidade de corrente de 1,19 mA.cm^{-2} , há o consumo de quase 5 mg.L^{-1} de cloreto, diminuindo essa faixa de consumo até a densidade de 9,99 mA.cm^{-2} . Então, para as densidades de 10,86 e 11,71 mA.cm^{-2} , observou-se a geração de cloro ativo de 2,6 e 5,67 mg.L^{-1} , respectivamente. Na solução de NaCl com *E. coli* o comportamento da curva de dispersão mostra apenas o consumo de cloro livre, sendo destacados os consumos máximos de 5,67, 6,78, 5,91 e 8,34 mg.L^{-1} para as densidades de corrente de 1,19; 5,1; 6,12 e 11,89 mA.cm^{-2} , respectivamente.

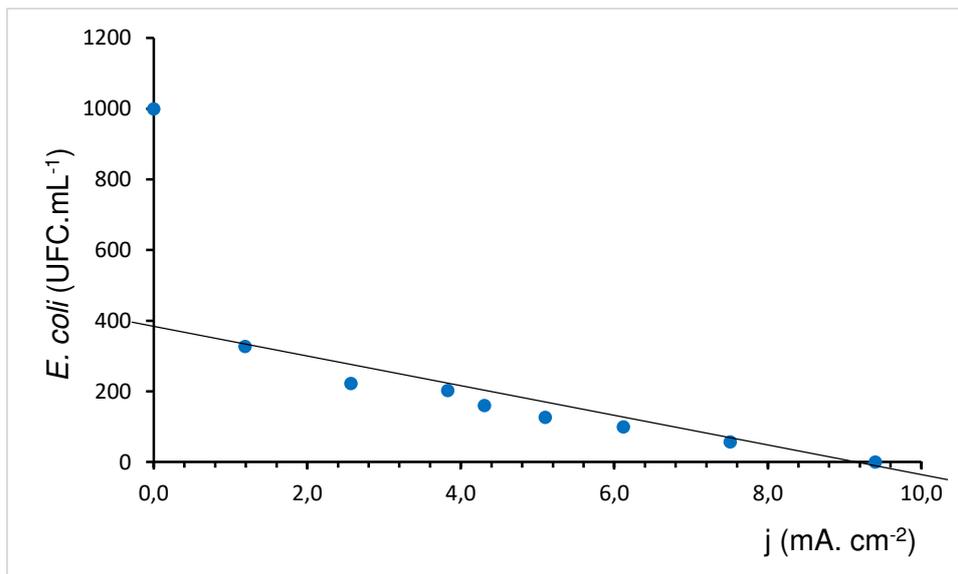
Ghasemian et al., (2017) estudaram a geração eletroquímica de cloro ativo na água em diferentes densidades de corrente constantes (1, 2, 4 e 10 mA.cm^{-2}), obtidas partindo-se da concentração fixa de cloreto 0,1 M, e na ausência de bactérias. Então nenhuma concentração significativa de cloro ativo foi detectada em experimentos com a densidade atual de 1 mA.cm^{-2} . A produção de cloro aumentou significativamente de $\sim 0,5 \text{ mg.L}^{-1}$ até 3,3 mg.L^{-1} após 20 minutos de eletrólise, uma vez que a densidade de corrente aumentou de 1,0 mA.cm^{-2} para 2,0 mA.cm^{-2} , e foi mantida relativamente constante com o tempo. No entanto, embora um aumento adicional na densidade de

corrente para 4,0 e 10,0 mA.cm⁻² resultou em um aumento na quantidade máxima de cloro produzido, e a quantidade de cloro diminuiu após 20 e 15 min nas respectivas densidades.

4.4.6 *E. coli* (UFC.mL⁻¹)

Em se tratando das contagens de colônias de *E. coli* em função das densidades de corrente as quais a solução de NaCl contaminada foi submetida, observou-se o comportamento mostrado na Figura 4.30.

Figura 4.30. Estudo da concentração de *E. coli* em função da densidade de corrente elétrica para a solução de NaCl



Da Figura 4.30, observa-se que, partindo-se da concentração de *E. coli* de 10³ UFC.mL⁻¹, aplicada a densidade de corrente de 1,19 mA.cm⁻², observou-se a diminuição considerável dessa concentração para 326,67 UFC.mL⁻¹ (redução de 67,33%). Posteriormente, conforme foram aumentadas as densidades de corrente, percebeu-se que as concentrações de bactérias continuaram reduzindo gradativamente, só que de forma menos acentuada que a observada na primeira densidade de corrente. Na solução de NaCl foram obtidos dois pontos de desinfecção de 100% de *E. coli*, que foram nas densidades de corrente de 9,4 e 11,89 mA.cm⁻², respectivamente.

O efeito decrescente gradativo de concentração é atribuído ao aumento da densidade de corrente aplicada ao processo. Maiores densidades de corrente corroboram para a geração de espécies mais oxidantes na superfície do ânodo, responsáveis pela desinfecção dos microrganismos (Schmalz et al., 2009; Gómez-López et al., 2013; Ghasemian et al., 2017). Entretanto, se a densidade de corrente atinge um valor limite, de acordo com as configurações da célula eletrolítica, essa energia passa a ser utilizada na produção de espécies de oxigênio, e não mais de agentes oxidantes, diminuindo reduzindo a capacidade de desinfecção do sistema (Särkkä et al., 2008).

4.5 Água de abastecimento público (*E. coli* = 10^3 UFC.mL⁻¹)

Realizados os experimentos de caracterização do sistema eletrolítico, utilizando as águas deionizada e soluções de NaCl, finalmente foram feitos os testes de desempenho desse sistema no tratamento da água de abastecimento público, que configura o objetivo maior desse trabalho. Sendo assim, as Tabelas 4.14 e 4.15 apresentam os resultados desses testes em termos dos mesmos parâmetros analisados nas seções anteriores.

Tabela 4.14. Parâmetros físico-químicos e de operação do sistema eletrolítico para a água de abastecimento público sem *E. coli*

ddp (V)	I (A)	j (mA.cm ⁻²)	k (μS.cm ⁻¹)	pH	T (NTU)	Cor (uH)	Cl ⁻ (mg.L ⁻¹)
0,0	0,00	0,00	574,5	7,89	1,7	0	158,11
2,0	0,21	0,83	582,6	8,12	3,9	10	162,83
3,0	0,46	1,82	584,5	8,45	4,6	10	159,76
4,0	0,65	2,57	573,9	8,71	8,4	22	161,89
5,0	0,85	3,36	575,2	8,74	11,6	24	162,36
6,0	1,05	4,15	572,6	8,69	15,3	29	159,29
7,0	1,22	4,89	585,3	8,45	14,7	31	159,29
8,0	1,51	5,96	582,2	8,46	15,3	29	163,31
9,0	1,67	6,60	589	8,47	14,1	27	163,07
10,0	1,80	7,11	580,6	8,61	11,7	22	160,23
11,0	2,03	8,02	578,8	8,68	10,1	21	160,70
12,0	2,24	8,85	581,9	8,71	11,2	27	162,12
13,0	2,43	9,6	583,1	8,92	20,8	42	160,00
14,0	2,56	10,11	581,1	8,73	16,5	31	159,76
15,0	2,65	10,47	577,1	8,88	15,5	31	159,05
16,0	2,87	11,33	579,2	8,8	18,6	39	162,83

Tabela 4.15. Parâmetros físico-químicos, de operação do sistema eletrolítico e parâmetros bacteriológicos para a água de abastecimento público com *E. coli*

ddp (V)	I (A)	j (mA.cm ⁻²)	k (μS.cm ⁻¹)	pH	T (NTU)	Cor (uH)	Cl ⁻ (mg.L ⁻¹)	<i>E. coli</i> (UFC.mL ⁻¹)
0,0	0,0	0,00	615,9	7,16	1,6	0	165,20	3000
2,0	0,18	0,71	618,3	7,41	2,4	4	165,44	933
3,0	0,38	1,50	624,2	7,48	2,7	6	162,46	867
4,0	0,60	2,37	613,3	8,15	4,7	10	162,60	767
5,0	0,80	3,16	608,7	8,33	9,0	17	162,83	643
6,0	0,91	3,60	601,3	8,28	11,4	23	162,60	627
7,0	0,97	3,83	609,2	8,21	12,4	24	160,70	553
8,0	1,14	4,50	609,3	8,10	14,7	26	162,84	510
9,0	1,27	5,02	617,9	8,10	16,1	30	163,78	433
10,0	1,41	5,57	605,4	8,17	18,1	31	161,65	397
11,0	1,62	6,40	614,4	8,11	13,4	24	162,69	270
12,0	2,0	7,90	603,1	8,15	14,9	26	161,89	110
13,0	2,51	9,92	611,7	8,15	13,4	24	162,83	0
14,0	2,81	11,1	607,6	8,28	15,2	41	161,65	0
15,0	2,96	11,7	604,8	8,40	16,7	36	164,49	0

A água de abastecimento público, como meio principal de estudo desse trabalho, caracterizou o sistema eletrolítico nas condições de condutividade elétrica na faixa de 600 μS.cm⁻¹, levando em consideração a presença de diversos íons interagindo nas reações eletrolíticas.

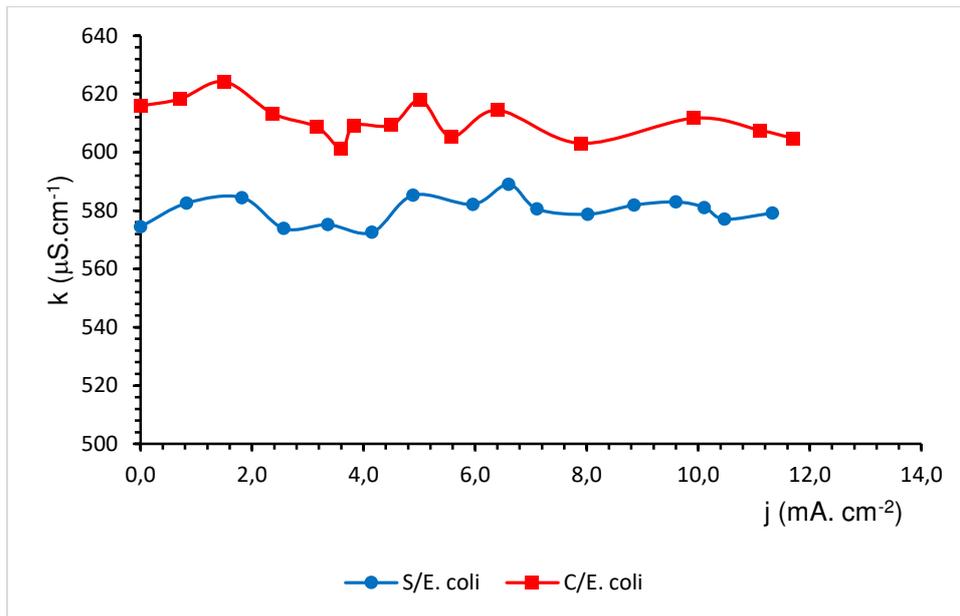
De forma análoga à solução de NaCl, a faixa de ddp a qual o sistema operou foram semelhantes, obtendo-se a corrente elétrica máxima de 2,96A em 15,0V.

Os parâmetros físico-químicos, de operação do sistema e bacteriológicos (no caso da água com *E. coli*) foram analisados individualmente, fazendo o comparativo entre as águas sem e com *E. coli*, nas seções seguintes.

4.5.1 Condutividade elétrica (k)

As curvas de dispersão de condutividade elétrica para as águas de abastecimento sem e com *E. coli* são apresentadas na Figura 4.31.

Figura 4.31. Estudo comparativo da condutividade elétrica em função da variação de densidade de corrente elétrica entre a água de abastecimento público sem e com *E. coli*

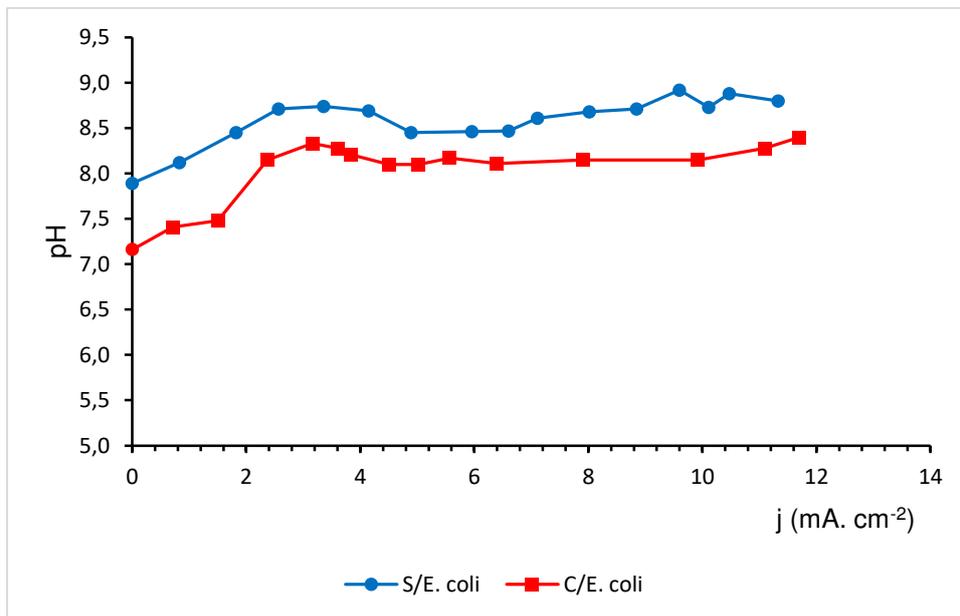


A condutividade elétrica das águas de abastecimento com e sem *E. coli*, assim como nas soluções de NaCl mostradas na seção anterior, apresentam uma discreta flutuação de valores. Inicialmente, para a água sem *E. coli*, o parâmetro varia de 574,5 para 582,6 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ na densidade de corrente 0,83 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, chegando ao seu valor máximo (589 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) na densidade de 6,60 $\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Para a água com *E. coli*, a curva de dispersão seguiu uma tendência semelhante de flutuação, embora tenha apresentado mais valores abaixo da condutividade inicial de 615,19 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Considerando essas observações, observa-se que a condutividade se mantém dentro de uma faixa semelhante de valores ao longo da eletrólise.

4.5.2 pH

A Figura 4.32 mostra os perfis de pH para as águas de abastecimento sem e com *E. coli* (10^3 UFC.mL⁻¹) em função das densidades de corrente aplicadas ao sistema eletrolítico.

Figura 4.32. Estudo comparativo do pH em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as águas de abastecimento sem e com *E. coli*



A Figura 4.32 indica que, para as duas condições de águas, há uma tendência de incremento do pH nas densidades de corrente iniciais. Para a água sem *E. coli*, o pH aumentou gradativamente na faixa de densidades de 0,83 a 2,57 mA.cm⁻², e a partir de 3,36 mA.cm⁻², os valores de pH se estabilizam. Nesse caso, o maior gradiente (1,03) foi observado na densidade de corrente 9,6 mA.cm⁻². Para a água com *E. coli*, houve um gradiente considerável de pH de 1,17, decorrente da densidade de corrente 3,16 mA.cm⁻², e após isso os valores oscilaram dentro da mesma faixa. Então o maior gradiente (1,24) de pH foi observado em 11,7 mA.cm⁻².

Nakajima et al., (2004) relataram uma alteração no pH de uma água de abastecimento eletrolisada sob correntes elétricas de 10, 20, 30, 40 e 50 mA, considerando os tempos de residência de 0 a 30 minutos. Nessas condições, foi obtida uma faixa de pH entre 7,3 e 8,9.

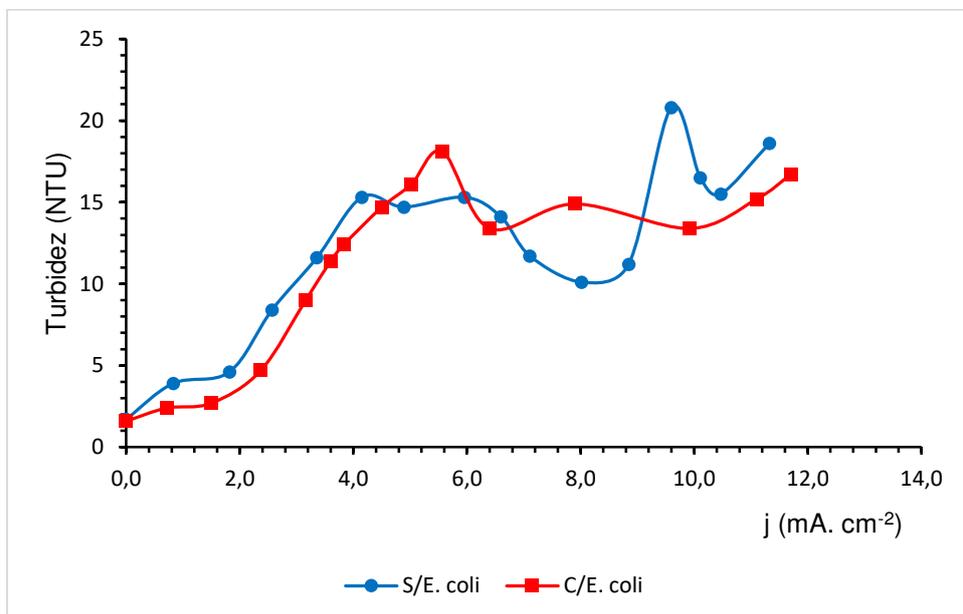
4.5.3 Turbidez (NTU)

A análise dos perfis de turbidez, apresentados na Figura 4.33, indica a tendência de aumento desse parâmetro nas duas condições de água de abastecimento público. Entretanto, para a água sem *E. coli*, foi observado um decréscimo de turbidez a partir de 4,89 mA.cm⁻², diminuindo de 14,7 NTU para 10,1 NTU na densidade de 8,02 mA.cm⁻². Em seguida a turbidez aumentou para 20,8 NTU

na densidade de $9,6 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, e novamente diminuiu para $18,6 \text{ NTU}$ em $11,33 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Para a água com *E. coli*, a turbidez aumentou gradativamente em função das densidades de corrente, até o valor de $18,1 \text{ NTU}$ sob a densidade de corrente $5,57 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. A partir de $6,4 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, a turbidez oscilou dentro de uma mesma faixa de valores, chegando a $16,7 \text{ NTU}$ na maior densidade de corrente aplicada ($11,7 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$).

Figura 4.33. Estudo comparativo da Turbidez em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as águas de abastecimento público sem e com *E. coli*



4.5.4 Cor (μH)

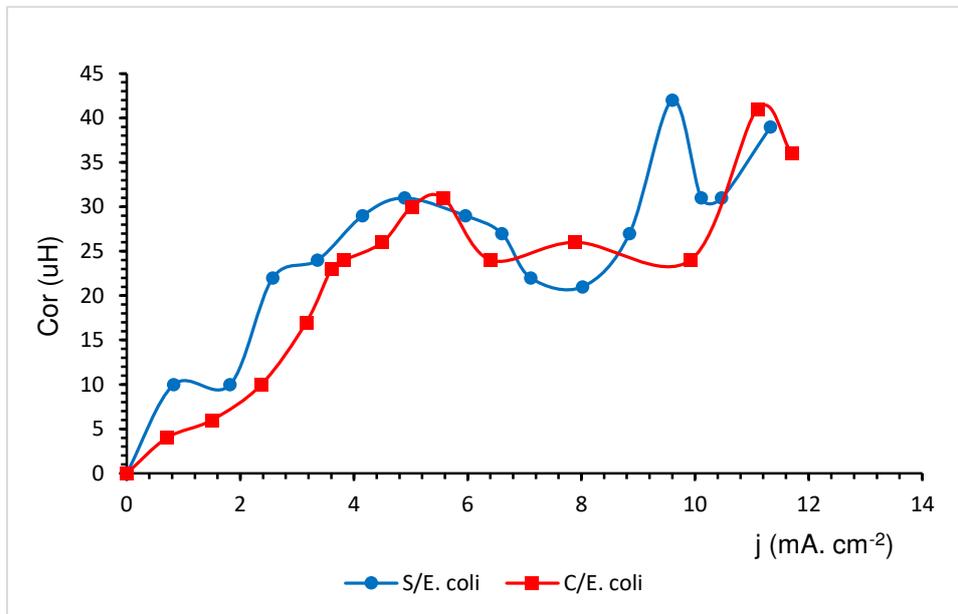
No estudo da cor, o comportamento das águas sem e com *E. coli* apresentam-se de forma semelhante, conforme pode ser analisado na Figura 4.34.

Assim como a turbidez, a cor apresentou uma tendência ao aumento conforme foram aplicadas gradativamente as densidades de corrente ao sistema nas duas condições da água de abastecimento.

Nas faixas de densidades de corrente em torno de $0,8$ até $5,0 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, houve o aumento de turbidez de forma proporcional nos dois casos. Acima de $5,0 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, a cor apresentou uma tendência ao decréscimo e uma certa estabilização, até que as

cores chegaram a valores acima de 40 uH nas densidades de corrente de 9,6 e 11,1 mA.cm⁻², para as água sem e com *E. coli*, respectivamente.

Figura 4.34. Estudo comparativo da Cor em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as águas de abastecimento sem e com *E. coli*



4.5.5 Cloreto (mg.L⁻¹)

O comportamento da concentração de íons Cl⁻, avaliada em função das densidades de corrente para as águas de abastecimento público local sem e com *E. coli*, pode ser estudado a partir da Figura 4.35.

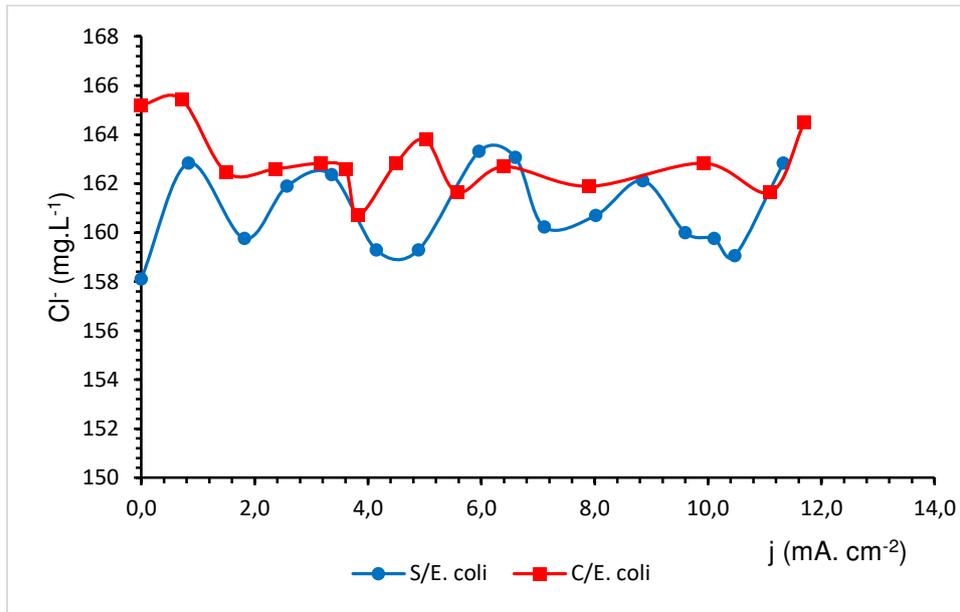
Para as águas sem e com *E. coli*, há um perfil claro de oscilações de concentrações de cloreto, caracterizadas pelo consumo e geração do íon ao longo do processo de eletrólise, embora essas oscilações ocorram dentro de uma mesma faixa de valores.

Para a água sem *E. coli*, os gradientes de concentração de Cl⁻ variaram nas densidades de corrente de 0,83 e 11,33 mA.cm⁻², respectivamente, tendo seu valor máximo de 4,72 em relação ao valor inicial (158,11mg.L⁻¹). Nesses dois casos, o cloreto estava sendo produzido durante a eletrólise.

No caso da água com *E. coli*, percebeu-se que no início da eletrólise, na densidade de corrente de 1,5 mA.cm⁻², houve um consumo de 2,74 mg.L⁻¹ de cloreto. A concentração foi estabilizada até um novo índice de consumo na densidade de 3,36

$\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, sendo consumidos $4,53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ de Cl^- . O consumo também foi observado nas densidades de $5,57$ e $11,1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, de $3,55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para os dois casos.

Figura 4.35. Estudo comparativo da concentração de Cl^- em função da variação de densidade de corrente elétrica entre as águas de abastecimento sem e com *E. coli*



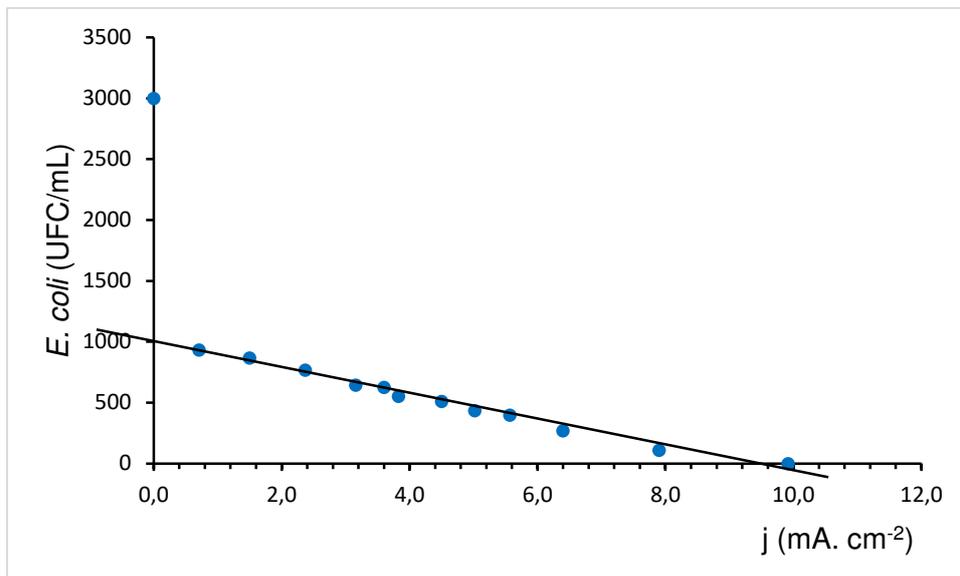
4.5.6 *E. coli* ($\text{UFC}\cdot\text{mL}^{-1}$)

No estudo de desinfecção de *E. coli* presente na água contaminada com a mesma na ordem de $10^3 \text{ UFC}\cdot\text{mL}^{-1}$, observou-se a contagem de colônias de bactérias em função das densidades de corrente aplicadas ao sistema. A Figura 4.36 ilustra esse comportamento.

A partir da densidade de corrente de $0,71 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, foi observada a redução de 1Log_{10} de *E. coli*. Esse nível de desinfecção foi mantido até a densidade de corrente de $7,9 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$. Dessa forma, entre $0,71$ e $7,9 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$, as porcentagens de desinfecção variaram de $68,89$ a $96,33\%$ em relação ao valor inicial.

Para as densidades de corrente de $9,92$, $11,1$ e $11,7$, respectivamente, a desinfecção de *E. coli* foi de 100% .

Figura 4.36. Estudo da desinfecção de *E. coli* em função da densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento (*E. coli* = 10^3 UFC.mL⁻¹)



4.6 Água de abastecimento (*E. coli* = 10^5 UFC.mL⁻¹)

A caracterização do sistema eletrolítico utilizando-se a água de abastecimento público local contaminada com *E. coli*, em laboratório, na ordem de concentração de 10^5 UFC.mL⁻¹, geraram os dados dos parâmetros físico-químicos e de desinfecção de *E. coli* dessa água, que são apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16. Parâmetros físico-químicos, de operação do sistema eletrolítico e parâmetro bacteriológico para a água de abastecimento público com *E. coli*

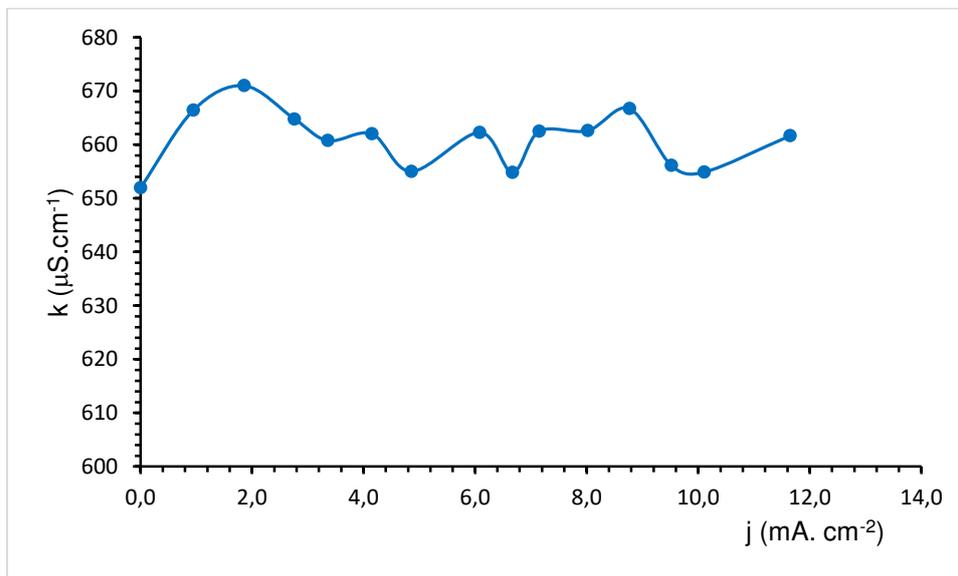
ddp (V)	I (A)	j (mA.cm ⁻²)	k (μS.cm ⁻¹)	pH	T (NTU)	C (μH)	Cl ⁻ (mg.L ⁻¹)	<i>E. coli</i> (UFC.mL ⁻¹)
0,0	0,00	0,00	652	7,46	1,90	0,00	167,32	100000
2,0	0,24	0,95	666,47	7,65	3,20	8,00	167,32	88667
3,0	0,47	1,86	671	7,7	3,60	9,67	167,76	80333
4,0	0,70	2,76	664,8	8,13	7,40	20,67	165,43	63667
5,0	0,85	3,36	660,77	8,37	10,00	21,33	165,43	46000
6,0	1,05	4,15	662,03	8,36	13,77	26,00	166,85	36000
7,0	1,23	4,86	655,03	8,3	14,23	27,33	168,03	22667
8,0	1,54	6,08	662,3	8,3	14,13	27,33	167,56	14000
9,0	1,69	6,67	654,87	8,37	15,00	26,33	167,32	7833
10,0	1,81	7,15	662,5	8,4	14,00	27,00	165,67	4900
11,0	2,03	8,02	662,63	8,37	15,03	26,33	166,38	2033
12,0	2,22	8,77	666,73	8,37	12,37	26,33	167,56	1267
13,0	2,41	9,52	656,13	8,42	18,13	34,67	165,91	750
14,0	2,56	10,11	654,9	8,43	16,70	31,33	166,85	423
15,0	2,95	11,65	661,67	8,36	17,83	37,33	165,67	47

Esses dados dos parâmetros físico-químicos e as análises de contagem de bactérias das amostras coletadas são estudados separadamente nas seções seguintes.

4.6.1 Condutividade elétrica (k)

Em se tratando da condutividade elétrica, esse parâmetro pode ser analisado em função das densidades de correntes aplicadas, conforme apresenta a Figura 4.37.

Figura 4.37. Condutividade elétrica em função da variação de densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento ($E. coli = 10^5 \text{ UFC.mL}^{-1}$)

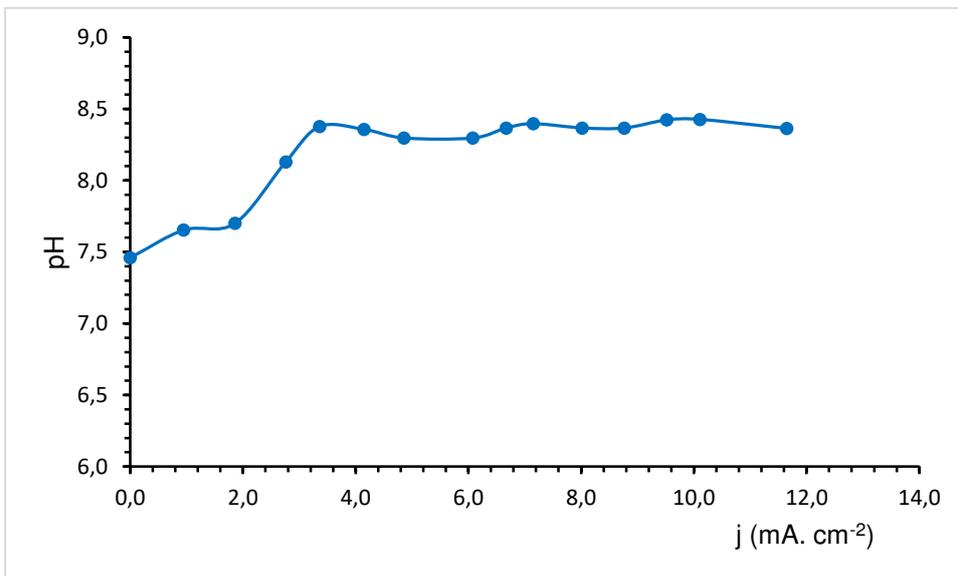


A curva de dispersão mostra que a partir da aplicação da densidade de corrente de $0,95 \text{ mA.cm}^{-2}$, há um gradiente de condutividade acima de $14,0 \mu\text{S.cm}^{-1}$. O parâmetro sofre algumas flutuações de valores conforme são aumentadas as densidades de corrente, mas, da mesma forma que nas águas deionizadas, soluções de NaCl e água de abastecimento contaminadas com 10^3 UFC.mL^{-1} de *E. coli*, essas variações não são consideráveis para o processo.

4.6.2 pH

O comportamento do parâmetro pH em função das densidades de corrente pode ser observado na Figura 4.38.

Figura 4.38. pH em função da variação de densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento ($E. coli = 10^5 \text{ UFC.mL}^{-1}$)

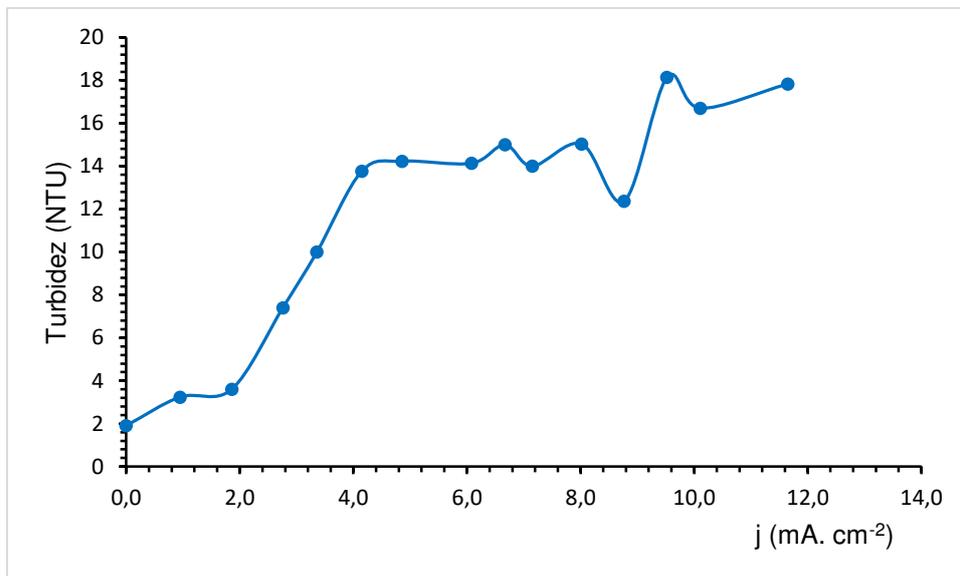


Partindo-se das densidades de corrente de $0,95$ e $1,86 \text{ mA.cm}^{-2}$, observou-se que o pH nessas condições se manteve semelhante ao valor inicial ($7,46$). Em contrapartida, a partir da densidade de corrente de $2,76 \text{ mA.cm}^{-2}$, percebeu-se um gradiente de pH de $0,67$. Nas densidades de corrente superiores, de $3,37$ à $11,65 \text{ mA.cm}^{-2}$, observou-se uma tendência de estabilização do pH, mas foram mantidos gradientes consideráveis em relação ao pH inicial, sendo registrada uma variação máxima de $0,97$ na densidade de corrente de $10,11 \text{ mA.cm}^{-2}$.

4.6.3 Turbidez (NTU)

A turbidez em função da densidade apresentou o comportamento ilustrado na Figura 4.39

Figura 4.39. Turbidez em função da variação de densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento ($E. coli = 1 \times 10^5 \text{ UFC.mL}^{-1}$)

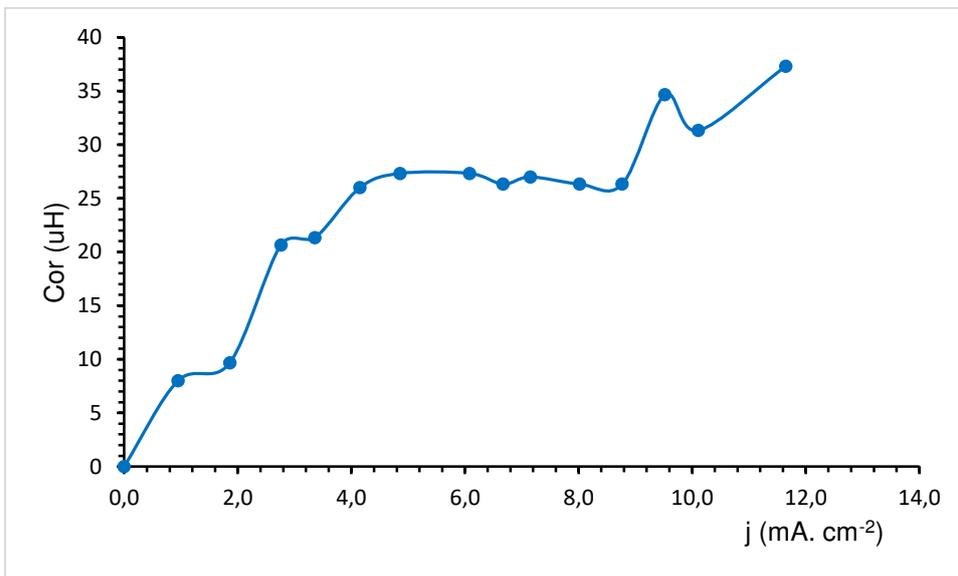


Assim como nas soluções de NaCl e água de abastecimento público com concentração de *E. coli* de 10^3 UFC.mL^{-1} , a turbidez para a água de abastecimento em maior concentração de bactérias apresentou uma tendência de variação crescente. Todavia, o comportamento do parâmetro apresentou menos flutuações. Da faixa de densidade de corrente de 1,86 a 4,15 mA.cm^{-2} , a turbidez apresentou um acréscimo gradativo acentuado, chegando a 13,77 NTU. Então foi estabilizada entre 14,0 e 15,0 NTU até a densidade de 8,77 mA.cm^{-2} . Novamente apresentou gradiente de 16,23 em relação a turbidez inicial na densidade de 9,52 mA.cm^{-2} , e nas densidades posteriores manteve-se nessa faixa de gradiente.

4.6.4 Cor (uH)

Para o parâmetro cor, também foi observado um acréscimo considerável em relação ao valor inicial de 0 uH. Conforme é apresentado na Figura 4.40, a partir das densidades de correntes de 2,76 e 3,36 mA.cm^{-2} , a cor apresentou valores acima de 20 uH, estabilizando-se entre 26 e 27 uH na faixa de densidade de 4,15 a 8,77 mA.cm^{-2} . A partir de 9,52 mA.cm^{-2} , a cor ultrapassa o valor de 30 uH.

Figura 4.40. Cor em função da variação de densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento ($E. coli = 10^5 \text{ UFC.mL}^{-1}$)

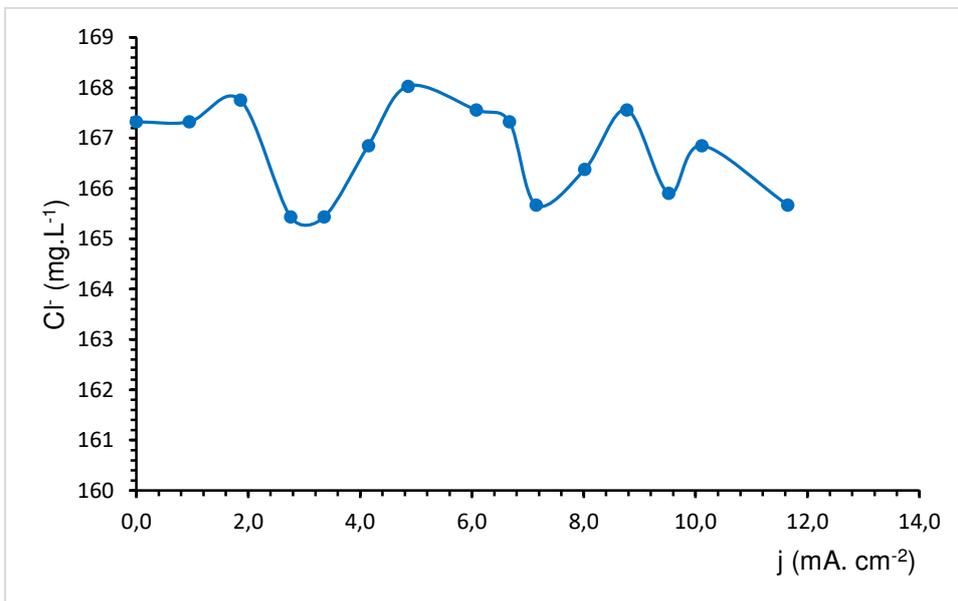


4.6.5 Cloreto (mg.L^{-1})

A concentração de cloreto para a água em questão apresenta variações consideráveis em relação às densidades de corrente aplicadas à mesma, como mostra a Figura 4.41.

De 0,95 a 1,86 mA.cm^{-2} , a concentração de Cl^- é mantida em torno do valor inicial de 167,32 mg.L^{-1} . Entre 2,76 e 3,36 mA.cm^{-2} , são observados indícios de consumo de Cl^- , com a diminuição da sua concentração em torno de 2,0 mg.L^{-1} . De 4,15 a 4,86 mA.cm^{-2} , o Cl^- é volta a ser produzido e é estabilizado aos valores iniciais. Na faixa entre 7,15 e 10,11 mA.cm^{-2} , a concentração de Cl^- oscila entre aumento e diminuição, até que na densidade de corrente máxima de 11,65 mA.cm^{-2} há o consumo de 1,67 mg.L^{-1} do íon.

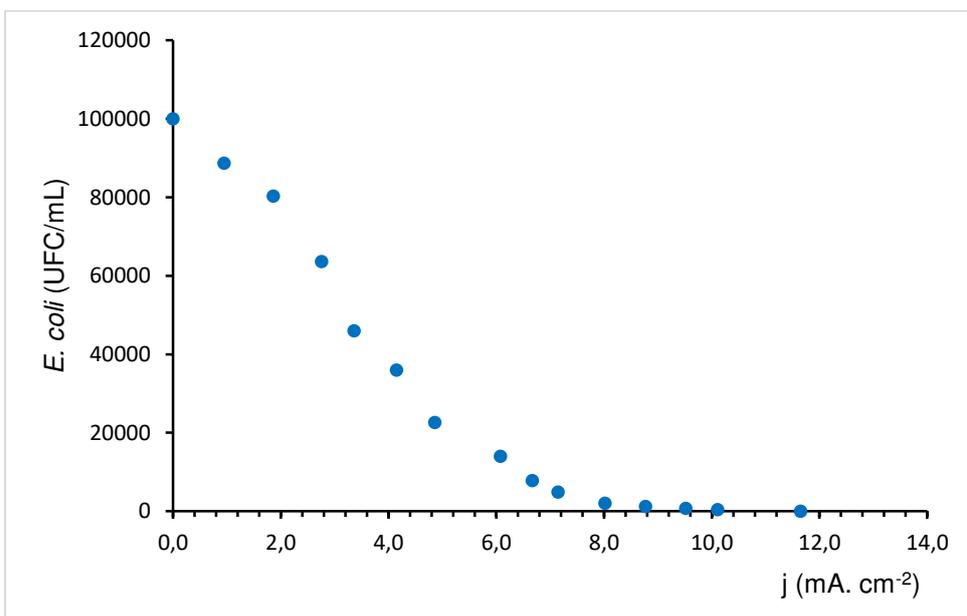
Figura 4.41. Concentração de Cl^- em função da variação de densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento ($E. coli = 10^5 \text{ UFC.mL}^{-1}$)



4.6.6 *E. coli* (UFC.mL^{-1})

Em relação à desinfecção de *E. coli* presente na água de abastecimento, foi observado seu perfil de comportamento em função da variação de densidades de corrente aplicadas ao sistema, conforme mostra a Figura 4.42.

Figura 4.42. Estudo da concentração de *E. coli* em função da densidade de corrente elétrica para a água de abastecimento ($E. coli = 10^5 \text{ UFC.mL}^{-1}$)



Nesse caso, a curva de dispersão mostra um perfil de decréscimo em número de colônias de *E. coli* conforme foram aumentadas as densidades de corrente sobre o sistema eletrolítico.

É importante ressaltar que na faixa de densidades de 0,95 a 6,08 mA.cm⁻², o número de colônias é reduzido em maiores gradientes entre uma densidade de outra. Entretanto, a partir de 6,67 mA.cm⁻², a desinfecção continua aumentando, só que de forma mais discreta entre uma densidade de corrente e outra. A partir de 0,95 mA.cm⁻² já pode ser notada a diminuição de 1Log₁₀ de bactérias. De 6,67 a 8,77 mA.cm⁻² essa diminuição foi de 2Log₁₀, chegando a 3Log₁₀ para 9,52 e 10,11 mA.cm⁻², e finalmente chegou-se a uma redução de 4Log₁₀ de *E. coli* na densidade de corrente máxima de 11,65 mA.cm⁻².

Em termos de porcentagem de desinfecção, para a água de abastecimento público local previamente contaminada em laboratório no nível de 10⁵ UFC.mL⁻¹, obteve-se 99,95% de remoção de bactérias da água. Todavia, esse valor não atende aos padrões microbiológicos de potabilidade presentes na Portaria Nº 2914/2011, do Ministério da Saúde, a qual necessita que haja a ausência total de *E. coli* em 100 mL de água.

4.7 Análise de níquel pelo método de absorção atômica com chama

A Tabela 4.17 mostra os resultados das análises das concentrações de níquel presentes nas amostras de água de abastecimento público local contaminada com *E. coli* na ordem de 10³ UFC.mL⁻¹, tanto na alimentação do sistema, quanto após ser submetida ao tratamento eletrolítico. Portanto, nas condições de densidades de corrente na faixa de 0 a 10,47 mA.cm⁻¹, e tempo médio de residência de 121,8s, conforme apresentado na Tabela 4.14, obteve-se as seguintes concentrações de níquel nas amostras, apresentadas na Tabela 4.17.

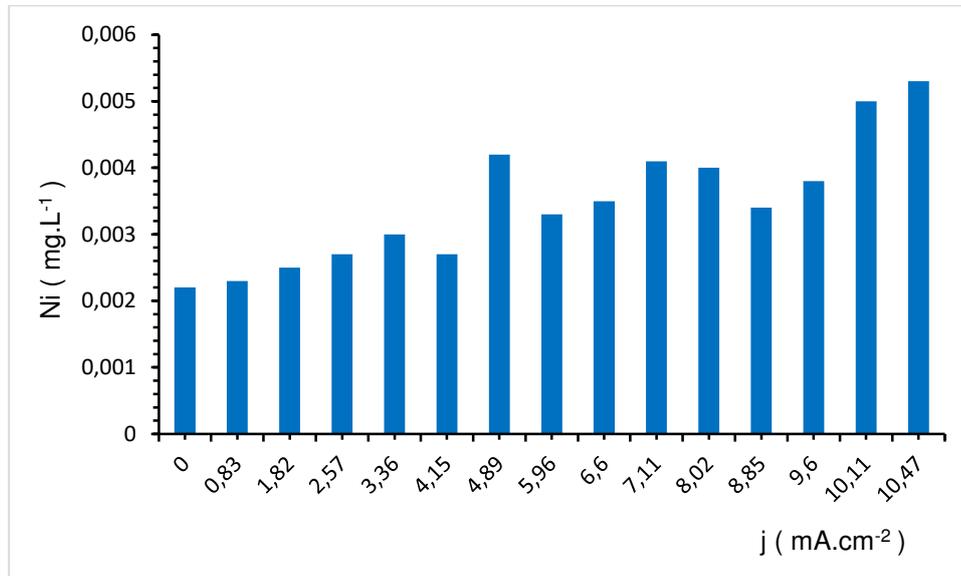
Tabela 4.17. Dados de concentrações de níquel nas amostras de água pelo método de absorção atômica com chama

j (mA.cm⁻²)	Ni (mg.L⁻¹)
0	0,0022
0,83	0,0023
1,82	0,0025
2,57	0,0027
3,36	0,0030
4,15	0,0027
4,89	0,0042
5,96	0,0033
6,60	0,0035
7,11	0,0041
8,02	0,004
8,85	0,0034
9,60	0,0038
10,11	0,005
10,47	0,0053

A partir da análise dos dados, pode ser observado que em relação à amostra de água antes do tratamento, há um leve aumento na concentração de níquel após a aplicação das diferenças de potenciais. Entretanto, para todos os potenciais, as concentrações de níquel encontram-se abaixo do valor máximo permissível de 0,07 mg.L⁻¹, de acordo com os padrões de potabilidade exigidos pela Portaria N° 2914/2011, do Ministério da Saúde.

A Figura 4.43 apresenta as concentrações de níquel em função das respectivas densidades de corrente aplicadas.

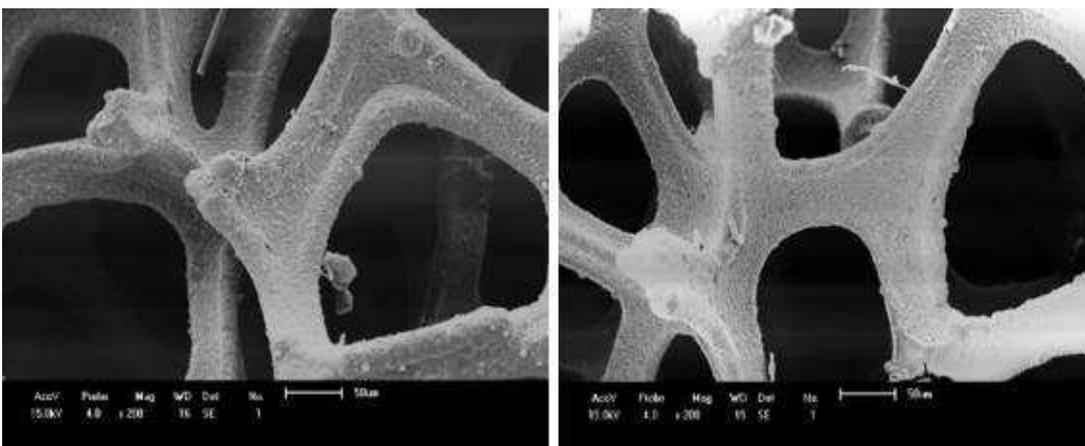
Figura 4.43. Variação da concentração de Níquel em função da diferença de potencial



4.8 Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) para eletrodos

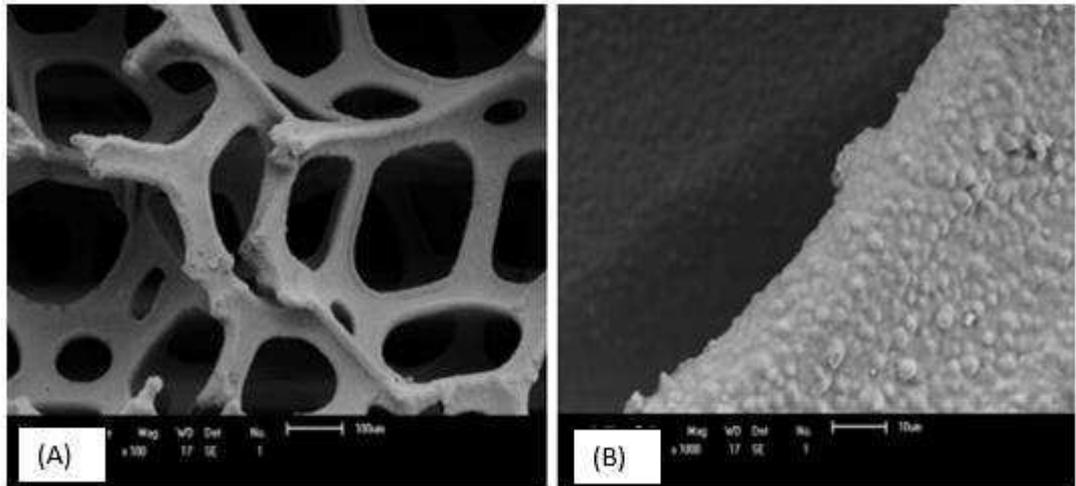
Para o eletrodo de esponja de níquel, foi realizada inicialmente a microscopia eletrônica com ampliação de 200x em uma amostra sem uso. Dessa forma, pode ser observada a morfologia dessa amostra na Figura 4.44.

Figura 4.44. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) para amostra de esponja de níquel sem uso, ampliada em 200x



Outra amostra de esponja de níquel foi analisada em termos de morfologia após os ensaios experimentais com eletrólise referentes à Etapa I. Nesse caso, essa amostra foi avaliada nas ampliações de 100 e 1000x, conforme mostra a Figura 4.45.

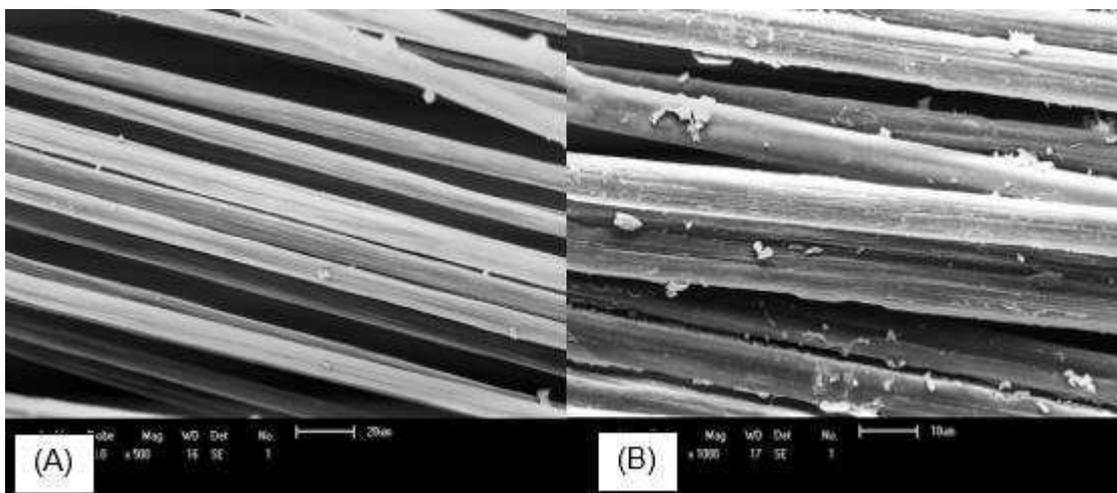
Figura 4.45. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) para amostra de esponja de níquel após eletrólise. (A) Ampliação em 100x. (B) Ampliação em 1000x



A análise das Figuras 4.49 e 4.50 não mostram alterações e danos na estrutura da esponja de níquel. Também é possível observar, através da Figura 4.45 (A) que não houve deposição de partículas nos poros da esponja.

As microscopias realizadas para a fibra de carbono antes e após o processo de eletrólise podem ser visualizadas na Figura 4.46. As amostras de fibra de carbono sem e com exposição à eletrólise foram avaliadas com ampliações de 500 e 1000x, respectivamente.

Figura 4.46. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) para amostras de fibra de carbono sem e com exposição à eletrólise. (A) ampliação em 500x. (B) ampliação em 1000x



Em relação à fibra de carbono, foi observado que, estruturalmente, as fibras não sofreram alteração após os ensaios experimentais com eletrólise. Em

contrapartida, notou-se uma deposição de partículas nessas fibras, que pode estar relacionada à incrustação da matéria orgânica e sais presentes na água. Tendo em vista que a fibra de carbono é composta por nanofios desse material, sendo bastante propenso a retenção de partículas, esse resultado foi aceitável na análise.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES

De posse dos dados obtidos na Etapa I, foi possível avaliar que, em termos de parâmetros físico-químicos:

- 1) a condutividade elétrica e o pH mantiveram-se dentro de uma faixa constante após a aplicação dos potenciais elétricos associados aos tempos médios de residência. Em contrapartida, a turbidez e cor apresentaram variações consideráveis em relação a água de alimentação, aumentando principalmente após os tempos de residência da mesma no sistema superiores a 60s. Todavia, para 9,0V observou-se que a cor se manteve constante e a turbidez apresentou valores semelhantes para todos os tempos de residência.
- 2) Em termos de desinfecção da bactéria *E. coli*, a aplicação das diferenças de potenciais de 5,0 e 7,0V mostraram desempenho mais satisfatório, chegando a porcentagens de remoção de bactéria de 99,84 e 9,40%, respectivamente, sob tempo médio de residência de 121,8s. Tanto para 3,0V, quanto para 9,0V, o desempenho máximo de desinfecção foi de 80%, nesse mesmo tempo considerado.

Partindo-se para os ensaios experimentais da Etapa II, percebeu-se que para as águas de alimentação do sistema: água deionizada, solução de NaCl, e águas de abastecimento público local, avaliadas no reator, sem e com presença de *E. coli*,

- 1) os parâmetros físico-químicos apresentaram perfis de variação semelhantes. Todavia, houve uma variação de turbidez e cor mais expressiva para as soluções de NaCl e águas de abastecimento público, inclusive com perfis acréscimo semelhantes, sugerindo que os íons em maior concentração nessas águas foram determinantes para esse comportamento;

- 2) A maior remoção no número de colônias de *E. coli* também pôde ser associada a essa concentração de íons na água de alimentação, bem como os níveis de concentração de bactérias nas mesmas. Dessa forma, para a água deionizada, mesmo aplicando-se densidades de corrente limites da fonte elétrica utilizada, o máximo de desinfecção de *E. coli* alcançado foi de 74,44%, devido a resistividade do meio para a passagem de corrente elétrica;
- 3) Para a solução de NaCl e água de abastecimento público (10^3 UFC.mL⁻¹), com condutividades elétricas mais elevadas, chegou-se ao nível de 100% em desinfecção da bactéria na água nas densidades de corrente superiores a 9,0 mA.cm⁻². Para a água de abastecimento público com concentração de *E. coli* ao nível de 10^5 UFC.mL⁻¹, o máximo de porcentagem de desinfecção obtido foi de 99,95%, mostrando que a concentração de bactérias no meio foi um fator limitante para a eficiência da desinfecção.
- 4) Os resultados das concentrações de níquel presentes nas amostras de água de abastecimento público (10^3 UFC.mL⁻¹), coletadas antes e após o tratamento eletrolítico, através da espectrometria de absorção com chama, mostraram que para todas elas, as concentrações de níquel encontraram-se abaixo do valor máximo permissível de 0,07 mg.L⁻¹, de acordo com os padrões de potabilidade exigidos pela Portaria N° 2914/2011, do MS.
- 5) As microscopias eletrônicas de varredura dos eletrodos de esponja de níquel e fibra de carbono, antes e após serem submetidos à eletrólise mostraram que a esponja de níquel manteve sua estrutura e poros sem deposição de partículas. Em contrapartida, a fibra de carbono apresentou, após os ensaios eletrolíticos, uma deposição de partículas, que podem ser de origem orgânica ou inorgânica.

CAPÍTULO VI

6. PERSPECTIVAS FUTURAS

As sugestões para trabalhos futuros são as seguintes:

- Modificar a composição da célula eletrolítica, considerando outros materiais para os eletrodos, bem como analisar o desempenho do sistema para diferentes tipos de eletrólitos;
- Analisar os efeitos da eletrólise aplicada ao sistema em outros microrganismos indicadores de contaminação: diferentes gêneros de bactérias, protozoários ou vírus, em termos de desinfecção;
- Realizar um estudo cinético das variações de concentrações dos íons presentes no meio aquoso versus a formação de agentes oxidantes para a desinfecção das espécies presentes.

CAPÍTULO VII

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABID, S. et al. Electrically conductive spacers for self-cleaning membrane surfaces via periodic electrolysis. **Desalination**, v. 416, p. 16-23, 2017.

BEDMAR, P. A. Isotopos en Hidrologia. 1 ed. Madrid: Alhambra, 1972.

BERGMANN, et al. New UV irradiation and direct electrolysis—promising methods for water disinfection. **Chemical Engineering Journal**, v. 85, p. 111–117, Janeiro 2002. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1385-8947\(01\)00188-7](https://doi.org/10.1016/S1385-8947(01)00188-7)>.

BERGMANN, H. et al. The influence of products and by-products obtained by drinking water electrolysis on microorganisms. **Microchemical Journal**, v. 89, p. 98–107, Janeiro 2008.

BERGMANN, H. M. E.; ROLLIN, J.; IOURTCHOUK, T. The occurrence of perchlorate during drinking water electrolysis using BDD anodes. **Electrochimica Acta**, v. 54, p. 2102–2107, 2009.

BRANDAO, L.E.B. Otimização de Unidades de Tratamento de Águas Residuais Urbanas e Industriais empregando-se Traçadores Radioativos. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2001.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria Nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, 2011

BRUGUERA-CASAMADA, et al. The ability of electrochemical oxidation with a BDD anode to inactivate Gram-negative and Gram-positive bacteria in low conductivity sulfate medium. **Chemosphere**, v. 163, p. 516-524, Novembro 2016.

CERQUEIRA, A. A.; MARQUES, M. R.; RUSSO, C. Avaliação do processo eletrolítico em corrente alternada no tratamento de água de produção. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, p. 59-63, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422011000100012>.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos Numéricos para Engenharia**. Tradução de Helena Castro. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2011.

CHEN, S. et al. Electrochemical disinfection of simulated ballast water on PbO₂/graphite felt electrode. **Marine Pollution Bulletin**, Fevereiro 2016. 1-5.

CHO, M. et al. Mechanisms of Escherichia coli inactivation by several disinfectants. **Water Research**, v. 44, p. 3410-3418, 2010.

CHRISTENSEN, P. A. et al. Photoelectrocatalytic and photocatalytic disinfection of E. coli suspensions by titanium dioxide. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 41, p. 371-386, Março 2003.

COEURET, F. **Introducción a la Ingeniería electroquímica**. Rennes: Editorial Reverté, S.A., 1992.

DELAED, Y. et al. The impact of electrochemical disinfection on Escherichia coli and Legionella pneumophila in tap water. **Microbiological Research**, p. 192-199, 2008.

DIAO, H. F. et al. Electron microscopic investigation of the bactericidal action of electrochemical disinfection in comparison with chlorination, ozonation and Fenton reaction. **Process Biochemistry**, v. 39, p. 1421-1426, Julho 2004.

DUNLING, W.; WANDA, F. Evaluation of media for simultaneous enumeration of total coliform and Escherichia coli in drinking water supplies. **Journal of Environmental Sciences**, v. 20, p. 273–277, 2008.

FOGLER, H. S. **Elements of Chemical Reaction Engineering**. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

FONSECA, I.; PROENÇA, L.; CAPELO, S. A voltametria cíclica e de varrimento linear unidirecional: suas potencialidades na caracterização de processos de corrosão. **Corrosão e proteção dos materiais**, v. 34, n. 1, p. 12-21, 2015.

GARFÍ, M. et al. Life cycle assessment of drinking water: Comparing conventional water treatment, reverse osmosis and mineral water in glass and mineral water in glass and plastic bottles. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 997-1003, Novembro 2016.

GHASEMIAN, S. et al. Electrochemical disinfection of bacteria-laden water using antimony-doped tin-tungsten-oxide electrodes. **Water Research**, 2017. In Press, Accepted Manuscript.

GHERNAOUT, D.; NACEUR, W.; AOUABED, A. On the dependence of chlorine by-products generated species formation of the electrode material and applied charge during electrochemical water treatment. **Desalination**, v. 270, p. 9-22, Abril 2011.

GOMES, T. A. T. et al. Diarrheagenic Escherichia coli, v. Dezembro, p. 3-30, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.bjm.2016.10.015>>.

GOMEZ-LÓPEZ, M. V.; GIL, I. M.; ALLENDE, A. A novel electrochemical device as a disinfection system to maintain. **Food Control**, p. 242-247, January 2017.

GOPA, K. et al. Chlorination byproducts, their toxicodynamics and removal from drinking water. **Journal of Hazardous Materials**, v. 140, p. 1-6, Fevereiro 2007.

HE, Y. et al. Reduction of Escherichia Coli using ceramic disk filter decorated by nano-TiO₂: A low-cost solution for household water purification. **Science of the Total Environment**, p. 1628–1637, Janeiro 2018.

HEIBATI, M. et al. Assessment of drinking water quality at the tap using fluorescence. **Water Research**, p. 1-10, Agosto 2017.

HUANG, X. et al. Electrochemical disinfection of toilet wastewater using wastewater. **Water Research**, p. 164-172, 2016.

IKONEN, J. et al. On-line detection of Escherichia coli intrusion in a pilot-scale drinking water distribution system. **Journal of Environmental Management**, p. 384-392, Maio 2017.

KERWICK, M. I. et al. Electrochemical disinfection, an environmentally acceptable method of drinking water disinfection? **Electrochimica Acta**, v. 50, p. 5270-5277, Setembro 2005.

KERWICK, M. I. et al. Electrochemical disinfection, an environmentally acceptable method of drinking water disinfection? **Electrochimica Acta**, v. 50, p. 5270-5277, 2005.

KHAN, K. et al. Prevalent fecal contamination in drinking water resources and potential health risks in Swat, Pakistan. **Journal of Environmental Sciences**, p. 1-12, 2017. Disponivel em: <<https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.12.008>>.

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

KOTNIK, T. et al. Electroporation-based applications in biotechnology. **Trends in biotechnology**, v. 33, p. 480-488, Agosto 2015.

LAUTENSCHLAGER, K. et al. A microbiology-based multi-parametric approach towards assessing biological stability in drinking water distribution networks. **Water Research**, v. 47, p. 3015-3025, Junho 2013.

LEROY, R. L. et al. Analysis of Time-Variation Effects in Water Electrolyzers. **Journal of the Electrochemical Society**, v. 126, p. 1674-1682, Outubro 1979.

LI, C. et al. Chlorine decay and trihalomethane formation following ferrate(VI) preoxidation and chlorination of drinking water. **Chemosphere**, v. 187, p. 413-420, Novembro 2017.

LI, H.; ZHU, X.; JINREN, N. Comparison of electrochemical method with ozonation, chlorination and monochloramination in drinking water disinfection. **Electrochimica Acta**, v. 56, p. 9789-9796, Novembro 2011.

LI, M. et al. Treatment of nitrate contaminated water using an electrochemical method. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 16, p. 6553-6557, Agosto 2010.

LING, Y.; XU, H.; CHEN, X. Continuous multi-cell electrochemical reactor for pollutant oxidation. **Chemical Engineering Science**, v. 122, p. 630-636, 2015.

LIU, F. et al. Study on the wastewater disinfection at the boron-doped diamond film electrode. **Procedia Environmental Sciences**, v. 12, p. 116-121, 2012.

LIU, T. et al. Formation process of mixed fouling of microbe and CaCO₃ in water systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 88, p. 249-254, 2002.

MAO, et al. Effects of conventional ozonation and electro-peroxone pretreatment of surface water on disinfection by-product formation during subsequent chlorination. **Water Research**, v. 130, p. 322-332, Março 2018.

MATSUNAGA, T. et al. TiN electrode reactor for disinfection of drinking water. **Water Research**, v. 34, p. 3117-3122, Agosto 2000.

MAZLOOMI, S. K.; SULAIMAN, N. Influencing factors of water electrolysis electrical efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 4257-4263, Agosto 2012.

MOUSSA, T. D. et al. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. **Journal of Environmental Management**, v. 186, p. 24-41, January 2017.

NAGAI, N. et al. Existence of optimum space between electrodes on hydrogen production by water electrolysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 35-41, Janeiro 2003.

NAKAJIMA, N. et al. Evaluation of disinfective potential of reactivated free chlorine in pooled tap water by electrolysis. **Journal of Microbiological Methods**, v. 57, n. 2, p. 163-173, Maio 2004.

NAPOTNIK, T. B.; MIKLAVČIČ, D. In vitro electroporation detection methods – An overview. **Bioelectrochemistry**, v. 120, p. 166-182, 2018.

PALACIOS, M.; PAMPILLÓN, J. F.; RODRÍGUEZ, M. E. ORGANOHALOGENATED COMPOUNDS LEVELS IN CHLORINATED DRINKING WATERS AND CURRENT COMPLIANCE WITH QUALITY STANDARDS THROUGHOUT THE EUROPEAN UNION. **Water Research**, v. 34, p. 1002-1016, 2000.

PANIZZA, M. Importance of electrode material in the electrochemical treatment of wastewater containing organic pollutants. **Electrochemistry for the environment**. New York: [s.n.], 2010. p. 25–54.

PAULI, A. R. D. et al. New insights on abatement of organic matter and reduction of toxicity from landfill leachate treated by the electrocoagulation process. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, p. 5448-5459, Dezembro 2107.

RAHMAN, A. P. H. et al. Mechanistic insight into the disinfection of Salmonella sp. by sun-light assisted sonophotocatalysis using doped ZnO nanoparticles. **Chemical Engineering Journal**, v. 336, p. 476-488, Março 2018.

RAJAB, M. et al. Electrochemical disinfection using boron-doped diamond electrode – The synergetic effects of in situ ozone and free chlorine generation. **Chemosphere**, v. 121, p. 47-53, Fevereiro 2015.

ROMPRÉ, A. et al. Detection and enumeration of coliforms in drinking water: current methods and emerging approaches. **Journal of Microbiological Methods**, v. 49, p. 31 – 54, 2002.

ROSARIO-ORTIZ, F. et al. How do you like your tap water? : Safe drinking water may not need to contain a residual disinfectant. **Science**, v. 351, p. 912-914, Fevereiro 2016.

SAMPAIO, V. C. S. Pré-tratamento de água para abastecimento humano utilizando processo eletrolítico por corrente contínua pulsada Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, centro de tecnologia, Programa de pós-graduação em Engenharia civil, Saneamento ambiental. Fortaleza, 2016

SASSAKI, R. A. Distribuição de tempos de residência em sistemas alimentados com vazão variável. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de pós-graduação em Engenharia Rio de Janeiro, 2005.

SCHAEFER, C. E.; ANDAYA, C.; URTIAGA, A. Assessment of disinfection and by-product formation during electrochemical treatment of surface water using a Ti/IrO₂ anode. **Chemical Engineering Journal**, p. 411-416, Março 2015.

SCHMALZ, V. et al. Electrochemical disinfection of biologically treated wastewater from small treatment systems by using boron-doped diamond (BDD) electrodes – Contribution for direct reuse of domestic wastewater. **Water Research**, v. 43, p. 5260-5266, Dezembro 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.08.036>>.

SCHOEN, D. T. et al. High Speed Water Sterilization Using One-Dimensional Nanostructures. **Nano Letters**, v. 10, p. 3628-3632, Agosto 2010.

SILVA, L. F. et al. Treatment of paint manufacturing wastewater by coagulation/electrochemical methods: Proposals for disposal and/or reuse of treated water, v. 101, p. 467-475, Setembro 2016.

SINGH, R. K. et al. Disinfection of Water Using Pulsed Power Technique: Effect of System Parameters and Kinetic Study. **Chemical Engineering Journal**, v. 284, p. 1184-1195, Janeiro 2016.

SONG, K.; TAGHIPOUR, F.; MOHSENI, M. Microorganisms inactivation by continuous and pulsed irradiation of ultraviolet light-emitting diodes (UV-LEDs). **Chemical Engineering Journal**, p. 1-31, Março 2018.

VUKUSIC, T. et al. Liquid-phase electrical discharge plasmas with a silver electrode for inactivation of a pure culture of Escherichia coli in water. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, p. 1-29, Julho 2016.

World Health Organization (WHO), 2015. Drinking-water. Fact Sheet. Water and health. Disponível em: <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs391/en/>> (Acessado em 21/03/18)

XI, J. et al. A novel model simulating reclaimed water disinfection by ozonation. **Separation and Purification Technology**, v. 179, p. 45-52, Maio 2017.

YARMUSH, M. L. et al. Electroporation-based technologies for medicine: principles, applications, and challenges, p. 295-320, 2014.

ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 3, p. 307-326, Junho 2010.

APÊNDICE A – Laudo de análise físico-química de uma amostra de água de abastecimento público da cidade de Campina Grande, realizada no LABDES (ano base 2016).



LABDES

Laudo N^o :640/2016	Data da Coleta: 22/09/2016
Interessado:	Resp. pela Coleta: Interessado
Município:	Data da Entrega da Amostra: 22/09/2016
Localidade:	Tipo de Recipiente: Garrafa plástica
Procedência: Abastecimento	Vazão(*): ---
	Data da Análise: 04/10/2016

PARÂMETROS	RESULTADOS	VMP (**)
Condutividade Elétrica, $\mu\text{mho/cm}$ a 25 °C	1.654,0	---
Potencial Hidrogeniônico, pH	7,4	6,0 a 9,5
Turbidez, (uT)	1,3	5,0
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).	10,0	15,0
Dureza em Cálcio (Ca^{++}), mg/L	31,8	---
Dureza em Magnésio (Mg^{++}), mg/L	56,8	---
Dureza Total (CaCO_3), mg/L	316,0	500,0
Sódio (Na^+), mg/L	232,6	200,0
Potássio (K^+), mg/L	10,5	---
Alumínio (Al^{3+}), mg/L	0,01	0,2
Ferro Total, mg/L	0,07	0,3
Alcalinidade em Hidróxidos, mg/L (CaCO_3)	0,0	---
Alcalinidade em Carbonatos, mg/L (CaCO_3)	0,0	---
Alcalinidade em Bicarbonatos, mg/L (CaCO_3)	90,4	---
Alcalinidade Total, mg/L (CaCO_3)	90,4	---
Sulfato (SO_4^{--}), mg/L	35,9	250,0
Fósforo Total, mg/L	0,3	---
Cloreto (Cl^-), mg/L	509,8	250,0
N-Nitrato (NO_3^-), mg/L	0,0	10,0

N-Nitrito (NO_2^-), mg/L	0,002	1,0
Amônia (NH_3), mg/L	0,51	1,5
Silica, mg/L (SiO_2)	0,3	---
ILS (Índice de Saturação de Langelier)	-0,73	≤ 0
STD (Sólidos Totais Dissolvidos a 180°C), mg/L	988,5	1.000,0

(*)Vazão Informada.

(**)VMP - Valor Máximo Permissível ou recomendável pela Legislação Brasileira (PORTARIA 2914/11 MS).

LAUDO:

De acordo com os resultados analíticos acima relacionados, esta água **não** se encontra dentro dos padrões de potabilidade no que se refere aos parâmetros físico-químicos.

OBSERVAÇÕES:

- Os resultados se referem única e exclusivamente à amostra de água analisada neste laboratório.
- Os dados de identificação da amostra foram fornecidos pelo interessado.

A divulgação dos resultados desta análise, assim como sua utilização para quaisquer fins, é de exclusiva responsabilidade do interessado.

Eng. Químico Responsável: Prof. Kepler B. França (CRQ – 9.19.3.1303118)

Visto da Coordenação: Prof. Kepler B. França

Data: 02/05/2018

APÊNDICE B – Tabelas de dados experimentais em triplicata, obtidos no estudo do tempo médio de residência (t_m), para as vazões 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 L.min⁻¹, respectivamente.

• 0,5 L.min⁻¹

$t_1(s)$	$t_2(s)$	$t_3(s)$	$\bar{t}(s)$	$k_1(\mu S.cm^{-1})$	$k_2(\mu S.cm^{-1})$	$k_3(\mu S.cm^{-1})$	$\bar{k}(\mu S.cm^{-1})$	$E(t)$	$t E(t)$
0	0	0	0	505	510	510	508,3333	0,0034	0
58	49	54	53,66667	506	512	512	510	0,003455	0,185401
59	50	56	55	507	514	517	512,6667	0,003473	0,191001
60	52	57	56,33333	511	515	522	516	0,003495	0,196903
61	53	58	57,33333	517	518	528	521	0,003529	0,20234
62	54	59	58,33333	527	521	537	528,3333	0,003579	0,208767
64	56	61	60,33333	539	524	544	535,6667	0,003629	0,218922
65	57	62	61,33333	552	527	554	544,3333	0,003687	0,226151
66	58	63	62,33333	567	528	569	554,6667	0,003757	0,234201
67	59	64	63,33333	598	531	581	570	0,003861	0,244537
68	60	66	64,66667	619	534	595	582,6667	0,003947	0,255233
70	62	67	66,33333	646	536	612	598	0,004051	0,268701
71	63	69	67,66667	675	538	624	612,3333	0,004148	0,280672
72	64	70	68,66667	694	541	639	624,6667	0,004231	0,290557
73	66	71	70	712	542	655	636,3333	0,00431	0,301731
75	67	72	71,33333	722	543	673	646	0,004376	0,312149
76	68	73	72,33333	731	545	683	653	0,004423	0,319955
77	69	75	73,66667	741	546	699	662	0,004484	0,330344
79	71	76	75,33333	752	549	711	670,6667	0,004543	0,34224
80	72	77	76,33333	759	551	726	678,6667	0,004597	0,35092
81	74	79	78	765	559	733	685,6667	0,004645	0,36228
82	75	80	79	774	571	739	694,6667	0,004706	0,371741
84	76	81	80,33333	776	591	744	703,6667	0,004767	0,382912
85	77	82	81,33333	783	613	746	714	0,004837	0,393372
86	79	83	82,66667	785	631	752	722,6667	0,004895	0,404674
91	80	85	85,33333	784	646	755	728,3333	0,004934	0,421003
93	81	86	86,66667	783	661	758	734	0,004972	0,430908
94	82	87	87,66667	782	670	760	737,3333	0,004995	0,43786
95	84	91	90	779	679	759	739	0,005006	0,45053
97	85	93	91,66667	775	685	758	739,3333	0,005008	0,45908
98	86	94	92,66667	772	691	756	739,6667	0,00501	0,464298
99	87	96	94	771	695	751	739	0,005006	0,470554
100	89	97	95,33333	768	696	745	736,3333	0,004988	0,475506
102	90	98	96,66667	763	699	741	734,3333	0,004974	0,480847
103	92	99	98	757	701	738	732	0,004958	0,48593
104	93	100	99	751	702	735	729,3333	0,00494	0,4891
106	95	102	101	745	701	732	726	0,004918	0,496701
107	97	103	102,3333	744	699	729	724	0,004904	0,501871
108	98	104	103,3333	738	697	727	720,6667	0,004882	0,504442
109	99	106	104,6667	730	696	724	716,6667	0,004855	0,508115
111	100	107	106	728	693	715	712	0,004823	0,511237
112	102	108	107,3333	720	691	706	705,6667	0,00478	0,513063
113	103	109	108,3333	713	688	701	700,6667	0,004746	0,514174
115	104	111	110	704	685	695	694,6667	0,004706	0,517614
116	105	112	111	699	682	688	689,6667	0,004672	0,51856
117	107	113	112,3333	690	679	684	684,3333	0,004636	0,520731
118	108	114	113,3333	683	676	679	679,3333	0,004602	0,521528
120	109	116	115	681	673	673	675,6667	0,004577	0,526341
121	110	117	116	679	668	667	671,3333	0,004548	0,527513
122	112	119	117,6667	674	664	661	666,3333	0,004514	0,531107
124	113	120	119	668	658	657	661	0,004478	0,532826
125	115	121	120,3333	659	654	652	655	0,004437	0,533905
126	116	122	121,3333	655	650	649	651,3333	0,004412	0,535328
127	117	123	122,3333	650	648	646	648	0,004389	0,536978
129	118	125	124	645	644	642	643,6667	0,00436	0,540654
130	120	126	125,3333	642	639	639	640	0,004335	0,543355
131	121	127	126,3333	639	635	636	636,6667	0,004313	0,544837
132	122	128	127,3333	632	631	634	632,3333	0,004283	0,545412
134	123	130	129	625	628	631	628	0,004254	0,548765
135	124	131	130	615	623	630	622,6667	0,004218	0,548322
136	126	132	131,3333	608	620	628	618,6667	0,004191	0,550387
137	127	133	132,3333	602	617	627	615,3333	0,004168	0,55159
139	128	135	134	597	615	622	611,3333	0,004141	0,554906
140	130	136	135,3333	592	612	618	607,3333	0,004114	0,556761
142	131	137	136,6667	588	609	615	604	0,004091	0,55916
143	132	139	138	584	605	611	600	0,004064	0,560876

144	133	140	139	581	601	606	596	0,004037	0,561174
145	135	141	140,3333	577	598	602	592,3333	0,004012	0,563072
147	136	142	141,6667	573	595	600	589,3333	0,003992	0,565543
148	138	144	143,3333	570	593	595	586	0,003969	0,56896
149	139	145	144,3333	567	591	592	583,3333	0,003951	0,570322
150	140	146	145,3333	565	588	588	580,3333	0,003931	0,57132
151	141	148	146,6667	561	585	585	577	0,003909	0,57325
153	142	149	148	559	583	581	574,3333	0,00389	0,575788
154	144	150	149,3333	557	581	578	572	0,003875	0,578615
156	145	151	150,6667	554	577	576	569	0,003854	0,580719
157	146	153	152	553	575	573	567	0,003841	0,583799
158	147	154	153	551	573	570	564,6667	0,003825	0,585222
160	149	155	154,6667	549	570	567	562	0,003807	0,588803
161	150	157	156	547	567	565	559,6667	0,003791	0,591413
162	152	158	157,3333	546	565	563	558	0,00378	0,594691
163	153	159	158,3333	544	563	561	556	0,003766	0,596326
164	154	161	159,6667	542	561	559	554	0,003753	0,599185
166	155	162	161	539	559	557	551,6667	0,003737	0,601644
167	156	163	162	537	558	555	550	0,003726	0,603552
168	158	165	163,6667	536	556	553	548,3333	0,003714	0,607913
169	159	166	164,6667	534	554	552	546,6667	0,003703	0,609769
171	160	167	166	533	551	550	544,6667	0,00369	0,612457
172	162	168	167,3333	532	549	548	543	0,003678	0,615487
173	163	169	168,3333	531	548	547	542	0,003671	0,618025
175	164	172	170,3333	529	545	545	539,6667	0,003656	0,622676
178	167	175	173,3333	528	542	544	538	0,003644	0,631686
180	168	179	175,6667	526	541	543	536,6667	0,003635	0,638603
181	169	180	176,6667	525	540	541	535,3333	0,003626	0,640642
182	177	182	180,3333	524	531	539	531,3333	0,003599	0,649053
184	178	184	182	523	530	538	530,3333	0,003592	0,653818
185	180	185	183,3333	522	528	537	529	0,003583	0,656952
188	182	186	185,3333	521	527	534	527,3333	0,003572	0,662027
189	184	187	186,6667	520	526	532	526	0,003563	0,665104
193	185	189	189	519	525	530	524,6667	0,003554	0,671171
194	187	193	191,3333	518	524	528	523,3333	0,003545	0,678275
196	191	195	194	517	523	527	522,3333	0,003538	0,686414
198	194	196	196	516	522	526	521,3333	0,003531	0,692163
202	196	198	198,6667	515	521	525	520,3333	0,003525	0,700234
203	199	199	200,3333	514	519	526	519,6667	0,00352	0,705204
208	200	203	203,6667	513	520	525	519,3333	0,003518	0,716478
215	201	204	206,6667	512	519	523	518	0,003509	0,725165
220	205	207	210,6667	511	518	522	517	0,003502	0,737774
228	209	209	215,3333	510	517	521	516	0,003495	0,752658
236	210	213	219,6667	507	516	520	514,3333	0,003484	0,765324
242	239	244	241,6667	506	511	514	510,3333	0,003457	0,835425

• $1,0 \text{ L.min}^{-1}$

$t_1(s)$	$t_2(s)$	$t_3(s)$	$\bar{t}(s)$	$k_1(\mu\text{S.cm}^{-1})$	$k_2(\mu\text{S.cm}^{-1})$	$k_3(\mu\text{S.cm}^{-1})$	$\bar{k}(\mu\text{S.cm}^{-1})$	$E(t)$	$t E(t)$
0	0	0	0,00	556,50	555,10	558,50	556,70	0,006184	0
46	44	39	43,00	560,90	559,40	562,80	561,03	0,006232	0,267979
48	51	40	46,33	573,40	575,20	571,30	573,30	0,006368	0,295067
49	52	42	47,67	578,00	581,00	577,20	578,73	0,006429	0,306435
50	53	44	49,00	586,30	584,70	584,30	585,10	0,006499	0,318472
51	54	45	50,00	592,10	593,50	589,70	591,77	0,006573	0,328674
52	55	46	51,00	594,00	628,40	597,30	606,57	0,006738	0,343632
54	56	47	52,33	595,10	662,30	612,10	623,17	0,006922	0,362266
55	57	49	53,67	608,20	671,00	615,90	631,70	0,007017	0,376582
56	58	50	54,67	617,10	673,00	626,50	638,87	0,007097	0,387951
57	59	51	55,67	628,60	673,40	636,10	646,03	0,007176	0,39948
58	60	52	56,67	633,60	675,00	642,00	650,20	0,007223	0,409279
59	61	53	57,67	639,50	675,20	645,30	653,33	0,007257	0,418508
60	63	54	59,00	651,10	674,90	646,50	657,50	0,007304	0,430916
61	64	55	60,00	656,20	673,60	648,60	659,47	0,007325	0,43953
62	65	56	61,00	658,70	672,20	651,30	660,73	0,00734	0,447714
63	66	57	62,00	660,60	669,40	654,70	661,57	0,007349	0,455627
64	68	58	63,33	675,20	668,60	657,60	667,13	0,007411	0,469342
65	70	60	65,00	678,60	667,10	660,90	668,87	0,00743	0,482945
67	75	61	67,67	675,10	664,30	661,80	667,07	0,00741	0,501405
68	76	73	72,33	674,30	662,70	663,80	666,93	0,007408	0,535877
69	78	75	74,00	671,40	660,30	665,90	665,87	0,007397	0,547348
70	79	76	75,00	663,50	658,20	663,20	661,63	0,00735	0,551218
72	80	77	76,33	661,70	657,30	662,60	660,53	0,007337	0,560084
74	81	78	77,67	660,80	654,50	656,30	657,20	0,0073	0,566992
75	82	79	78,67	657,10	653,50	655,30	655,30	0,007279	0,572632
76	83	80	79,67	656,80	652,40	654,00	654,40	0,007269	0,579114
83	84	81	82,67	651,00	650,80	653,60	651,80	0,00724	0,598535
84	85	83	84,00	646,50	648,50	656,10	650,37	0,007224	0,606851
85	86	86	85,67	643,40	647,40	648,80	646,53	0,007182	0,615244
86	87	88	87,00	637,10	645,20	647,40	643,23	0,007145	0,62163
87	94	90	90,33	634,90	630,20	643,30	636,13	0,007066	0,638323
88	95	91	91,33	632,50	625,90	634,20	630,87	0,007008	0,640046
89	96	93	92,67	629,60	622,20	631,40	627,73	0,006973	0,646165
90	97	94	93,67	632,70	619,40	630,00	627,37	0,006969	0,652756
91	98	95	94,67	631,50	620,80	628,10	626,80	0,006963	0,659129
93	99	96	96,00	629,90	621,70	621,80	624,47	0,006937	0,665924
94	100	98	97,33	627,60	616,00	621,20	621,60	0,006905	0,672074
97	101	99	99,00	620,10	610,00	620,30	616,80	0,006852	0,678303
98	102	100	100,00	615,80	607,80	616,80	613,47	0,006815	0,681452
99	103	102	101,33	614,90	606,00	604,70	608,53	0,00676	0,684985
100	104	103	102,33	610,90	604,00	602,40	605,77	0,006729	0,6886
101	112	105	106,00	609,60	598,20	601,60	603,13	0,0067	0,710172
102	113	106	107,00	608,70	595,90	599,40	601,33	0,00668	0,714732
103	115	108	108,67	609,20	594,20	598,40	600,60	0,006672	0,72498
104	116	109	109,67	608,60	593,70	594,60	598,97	0,006653	0,729662
108	120	114	114,00	602,50	588,70	592,30	594,50	0,006604	0,752837
109	123	124	118,67	600,60	587,00	584,10	590,57	0,00656	0,77847
111	124	125	120,00	599,00	586,10	581,30	588,80	0,006541	0,784862
112	126	126	121,33	598,50	585,30	574,10	585,97	0,006509	0,789764
123	127	146	132,00	572,70	585,10	566,20	574,67	0,006384	0,842625
128	128	147	134,33	569,80	580,20	565,70	571,90	0,006353	0,853391
134	135	149	139,33	567,10	572,90	559,20	566,40	0,006292	0,876643
143	148	150	147,00	557,00	559,20	558,90	558,37	0,006202	0,911761

• $1,5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$

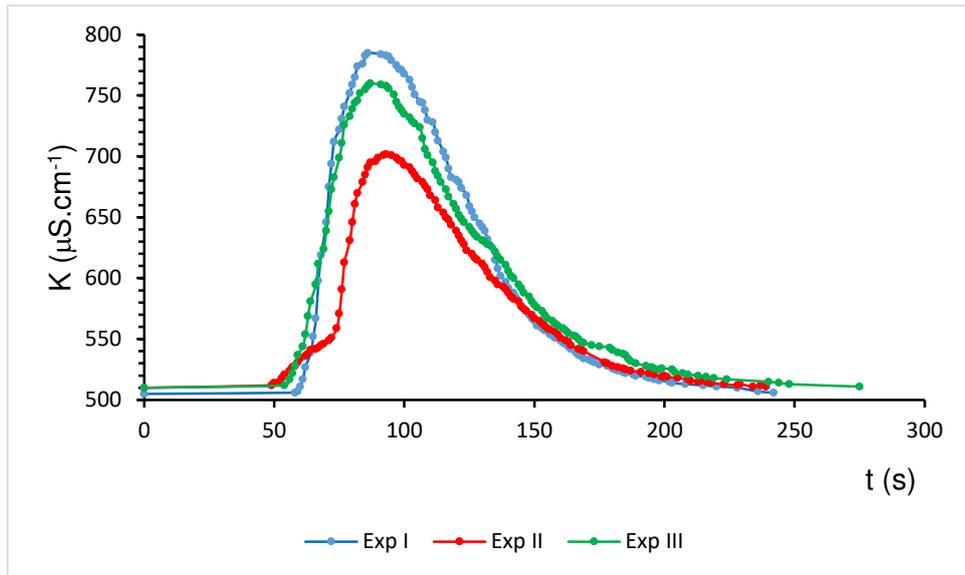
$t_1(s)$	$t_2(s)$	$t_3(s)$	$\bar{t}(s)$	$k_1(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	$k_2(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	$k_3(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	$\bar{k}(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	$E(t)$	$t E(t)$
0	0	0	0	544,3	547,7	546,2	546,0667	0,007125	0
30	27	29	28,66667	549,2	551,9	549,5	550,2	0,007179	0,205791
31	28	30	29,66667	596,4	565,4	571,3	577,7	0,007538	0,223614
32	29	31	30,66667	609,1	583,5	611,6	601,4	0,007847	0,240635
33	30	32	31,66667	619,1	623,4	625,7	622,7333	0,008125	0,257296
34	31	33	32,66667	634,3	655	649,2	646,1667	0,008431	0,275409
36	32	34	34	654,8	675,2	668,6	666,2	0,008692	0,295537
37	33	36	35,33333	697,9	676	689,1	687,6667	0,008972	0,317023
38	34	37	36,33333	716,6	694,8	701,5	704,3	0,009189	0,333881
39	35	39	37,66667	717,9	703,5	722,4	714,6	0,009324	0,351196
40	36	40	38,66667	724,1	718,1	731,8	724,6667	0,009455	0,365598
41	37	42	40	725,6	726,1	727,2	726,3	0,009476	0,379057
42	38	43	41	733,7	732	724,5	730,0667	0,009526	0,390549
46	39	44	43	735,4	734,1	720,8	730,1	0,009526	0,409619
48	40	45	44,33333	727	736	717,6	726,8667	0,009484	0,42045
49	41	47	45,66667	723,9	733,9	714,9	724,2333	0,009449	0,431526
51	42	49	47,33333	715,4	732,2	713,1	720,2333	0,009397	0,444804
52	50	52	51,33333	709,7	729,9	710,4	716,6667	0,009351	0,480005
53	51	53	52,33333	704,5	725,1	706,3	711,9667	0,009289	0,486146
54	52	55	53,66667	700,5	724,1	702,7	709,1	0,009252	0,496525
55	53	56	54,66667	696,2	712,2	697,3	701,9	0,009158	0,500641
56	54	57	55,66667	692,2	709,3	695,9	699,1333	0,009122	0,50779
57	56	58	57	691,6	706,2	692,2	696,6667	0,00909	0,518118
58	57	60	58,33333	689,3	698,9	687,5	691,9	0,009028	0,52661
59	58	61	59,33333	688,3	692,9	684,3	688,5	0,008983	0,533005
60	60	62	60,66667	681,6	688,7	681,4	683,9	0,008923	0,541342
62	61	63	62	679,5	685,8	678,8	681,3667	0,00889	0,55119
63	63	64	63,33333	673,2	683,7	677,2	678,0333	0,008847	0,560289
64	64	65	64,33333	668	680,2	673,4	673,8667	0,008792	0,565638
65	65	66	65,33333	666	677,4	669,8	671,0667	0,008756	0,572044
66	66	67	66,33333	659,3	671,4	664,1	664,9333	0,008676	0,575491
67	67	68	67,33333	653,2	666,3	660,1	659,8667	0,00861	0,579716
68	70	69	69	649,9	658,3	655,3	654,5	0,00854	0,589234
69	71	70	70	648,2	652	651,7	650,6333	0,008489	0,594242
70	72	71	71	645,5	649,8	648,2	647,8333	0,008453	0,600137
71	73	72	72	643,4	643,1	644,3	643,6	0,008397	0,604613
72	75	73	73,33333	638,8	639,8	640,7	639,7667	0,008347	0,612142
73	76	74	74,33333	635,5	632,4	636,7	634,8667	0,008283	0,615737
75	78	75	76	634,7	631,6	632,5	632,9333	0,008258	0,627625
77	79	76	77,33333	632,1	628,2	629,4	629,9	0,008219	0,635576
78	80	78	78,66667	629	620,5	624,9	624,8	0,008152	0,641299
79	81	79	79,66667	627,1	618,9	620,3	622,1	0,008117	0,646645
80	85	80	81,66667	622,3	617	617	618,7667	0,008073	0,659327
81	86	81	82,66667	618,2	613,7	614,7	615,5333	0,008031	0,663912
82	87	83	84	614,4	610,7	611,2	612,1	0,007986	0,670858
83	88	85	85,33333	613,1	604,3	605,5	607,6333	0,007928	0,676533
84	89	86	86,33333	609,6	600,3	601	603,6333	0,007876	0,679956
85	90	87	87,33333	607,7	599,3	597,6	601,5333	0,007849	0,685439
86	91	88	88,33333	602,1	596,1	595,2	597,8	0,0078	0,688984
87	92	90	89,66667	600,6	593,4	593,7	595,9	0,007775	0,697161
88	93	91	90,66667	598,7	591,9	590,3	593,6333	0,007745	0,702255
89	94	93	92	590,2	590,1	586,7	589	0,007685	0,70702
90	97	94	93,66667	588,9	581,9	580,9	583,9	0,007618	0,713596
92	100	95	95,66667	586	580,9	577,8	581,5667	0,007588	0,72592
93	101	96	96,66667	584	579,8	575,1	579,6333	0,007563	0,73107
96	102	99	99	579,5	577,3	569,8	575,5333	0,007509	0,74342
97	108	105	103,3333	577,4	569	560	568,8	0,007421	0,766883
98	110	111	106,3333	574,3	564,1	552,8	563,7333	0,007355	0,782117
100	111	115	108,6667	573,5	563,5	550,3	562,4333	0,007338	0,797437
101	112	117	110	571,8	557,4	548,4	559,2	0,007296	0,802581
110	122	120	117,3333	557,4	550	547	551,4667	0,007195	0,844247
119	123	121	121	544,2	549,5	546,9	546,8667	0,007135	0,863367

• $2,0 \text{ L.min}^{-1}$

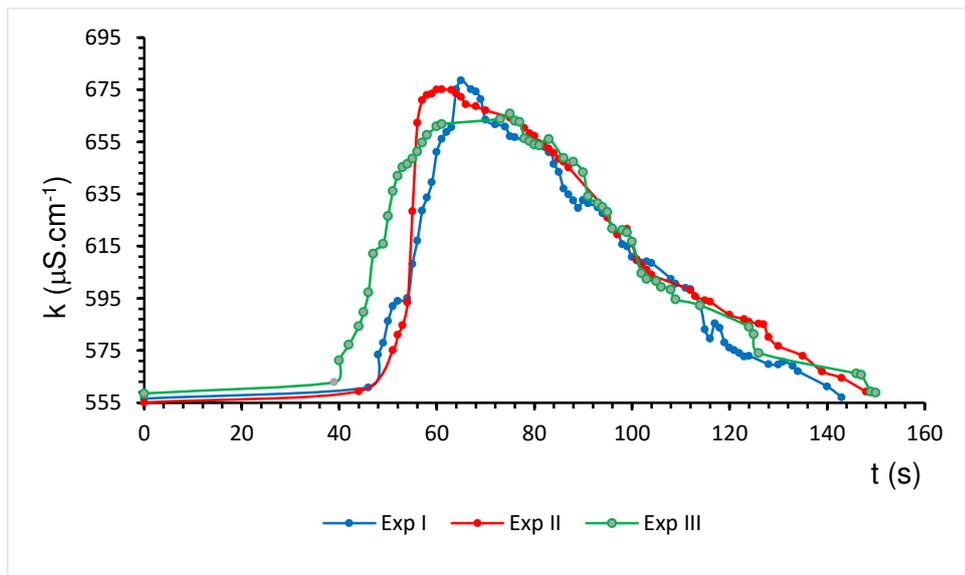
$t_1(s)$	$t_2(s)$	$t_3(s)$	$\bar{t}(s)$	$k_1(\mu\text{S.cm}^{-1})$	$k_2(\mu\text{S.cm}^{-1})$	$k_3(\mu\text{S.cm}^{-1})$	$\bar{k}(\mu\text{S.cm}^{-1})$	$E(t)$	$t E(t)$
0	0	0	0	509	514	512	511,6667	0,008241	0
23	22	22	22,33333	517	520	524	520,3333	0,00838	0,187159
25	23	23	23,66667	532	556	602	563,3333	0,009073	0,214722
26	24	24	24,66667	650	694	777	707	0,011387	0,28087
27	26	25	26	752	977	1026	918,3333	0,01479	0,384546
28	27	27	27,33333	908	1205	1187	1100	0,017716	0,48424
30	28	28	28,66667	986	1316	1245	1182,333	0,019042	0,545874
31	30	29	30	1046	1297	1248	1197	0,019278	0,57835
32	31	31	31,33333	1073	1231	1192	1165,333	0,018768	0,588074
33	32	32	32,33333	1076	1122	1122	1106,667	0,017823	0,576292
35	33	33	33,66667	1053	1021	1051	1041,667	0,016777	0,564812
36	35	34	35	1015	937	973	975	0,015703	0,549601
37	36	35	36	977	868	906	917	0,014769	0,531676
38	37	37	37,33333	912	819	849	860	0,013851	0,517095
40	39	38	39	878	763	796	812,3333	0,013083	0,510239
41	40	40	40,33333	820	703	753	758,6667	0,012219	0,492822
42	41	41	41,33333	799	670	712	727	0,011709	0,48396
44	42	42	42,66667	757	643	682	694	0,011177	0,476895
45	44	43	44	729	627	659	671,6667	0,010818	0,475972
46	45	44	45	695	608	636	646,3333	0,01041	0,468429
47	46	46	46,33333	679	589	617	628,3333	0,01012	0,468877
49	48	47	48	657	576	601	611,3333	0,009846	0,472601
50	49	48	49	638	567	588	597,6667	0,009626	0,471661
51	50	50	50,33333	621	559	577	585,6667	0,009432	0,474768
52	51	51	51,33333	606	554	568	576	0,009277	0,476208
54	53	52	53	594	547	561	567,3333	0,009137	0,484272
55	54	53	54	585	544	554	561	0,009035	0,487901
56	55	55	55,33333	578	541	547	555,3333	0,008944	0,494898
58	56	56	56,66667	569	537	543	549,6667	0,008853	0,501651
59	58	57	58	563	534	539	545,3333	0,008783	0,509407
60	59	58	59	555	532	536	541	0,008713	0,514072
61	60	60	60,33333	548	531	534	537,6667	0,008659	0,522451
63	61	61	61,66667	543	529	532	534,6667	0,008611	0,531017
64	63	63	63,33333	540	528	530	532,6667	0,008579	0,543329
65	64	64	64,33333	536	526	529	530,3333	0,008541	0,54949
67	65	65	65,66667	534	525	528	529	0,00852	0,559468
68	67	66	67	532	524	526	527,3333	0,008493	0,56903
69	68	67	68	530	523	525	526	0,008472	0,576063
70	71	69	70	528	522	524	524,6667	0,00845	0,591502
72	73	70	71,66667	526	521	523	523,3333	0,008429	0,604047
73	74	71	72,66667	524	520	522	522	0,008407	0,610915
74	76	74	74,66667	523	519	521	521	0,008391	0,626527
76	79	77	77,33333	522	518	520	520	0,008375	0,647657
77	82	79	79,33333	521	517	519	519	0,008359	0,663129
78	90	83	83,66667	520	516	518	518	0,008343	0,698003
79	94	88	87	519	515	517	517	0,008327	0,724411
104	103	91	99,33333	512	514	516	514	0,008278	0,822305

APÊNDICE C – curvas referentes às condutividades elétricas monitoradas na saída do sistema em função do tempo, para os ensaios em triplicata realizados para as vazões de 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 L.min⁻¹, respectivamente.

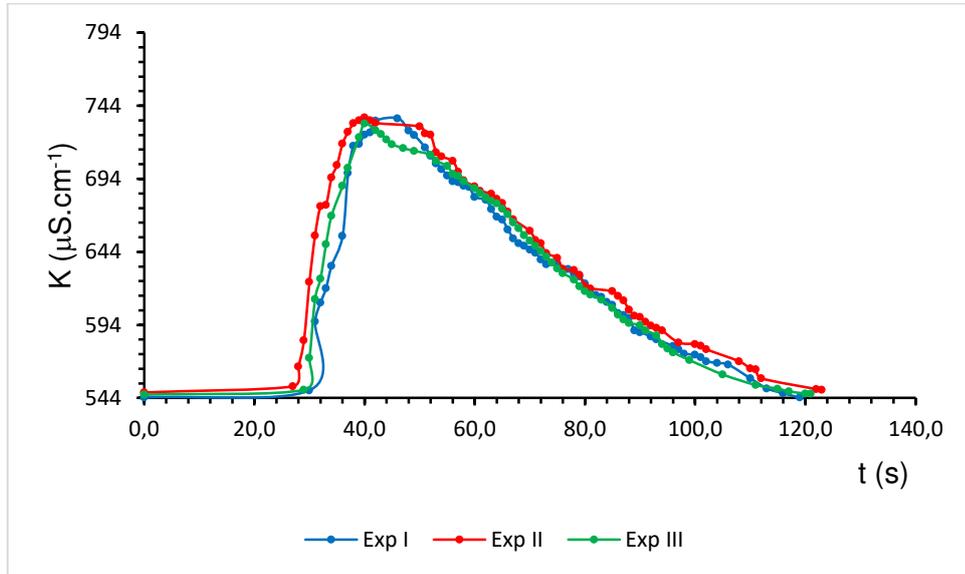
- Curvas resposta da condutividade elétrica em função do tempo para os Exp. I, II e III (Q = 0,5 L.min⁻¹)



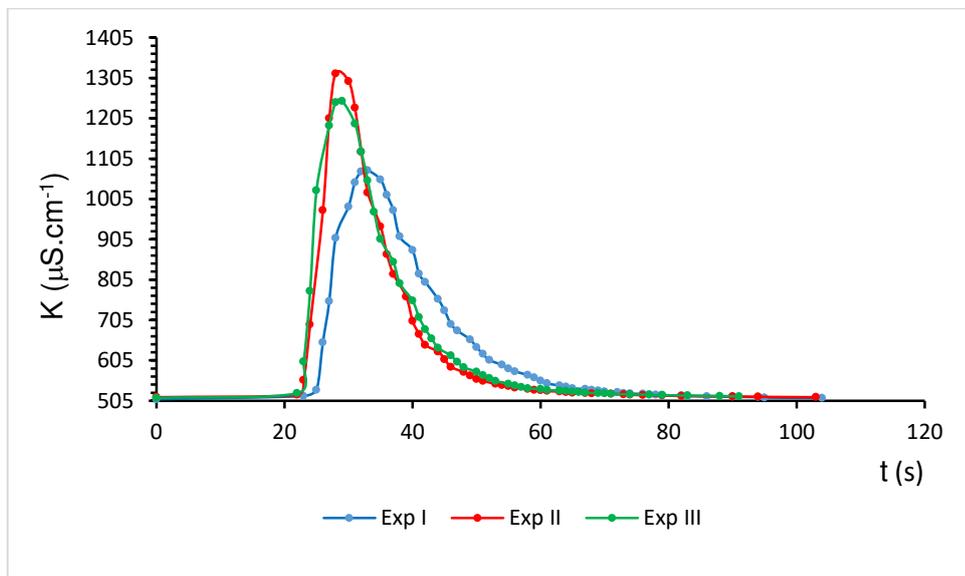
- Curvas resposta da condutividade elétrica em função do tempo para os Exp. I, II e III (Q = 1,0 L.min⁻¹)



- Curvas resposta da condutividade elétrica em função do tempo para os Exp. I, II e III ($Q = 1,5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)



- Curvas resposta da condutividade elétrica em função do tempo para os Exp. I, II e III ($Q = 2,0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$)



APÊNDICE D – Tabelas de dados experimentais dos parâmetros físico químicos e da desinfecção de *E. coli*, em triplicata, para as águas estudadas na Etapa II.

- Dados experimentais obtidos em triplicata para a água deionizada sem *E. coli*

I ₁	I ₂	I ₃	J ₁	J ₂	J ₃	K ₁	K ₁	K ₃	pH ₁	pH ₂	pH ₃	T ₁	T ₂	T ₃	Cl ₁	Cl ₂	Cl ₃
0,09	0,08	0,04	0,36	0,30	0,16	11,83	11,8	11,68	7,61	7,62	7,54	0,7	0,8	0,9	21,98	21,27	21,27
0,14	0,12	0,13	0,55	0,50	0,51	10,9	10,78	10,81	8,05	8,07	8,12	1,2	1,0	1,1	22,69	21,98	23,40
0,26	0,23	0,20	1,03	0,90	0,79	11,41	11,37	11,24	8,19	8,23	8,21	0,9	1,2	1,2	23,40	22,69	21,27
0,30	0,29	0,31	1,18	1,10	1,22	12,74	12,70	12,84	8,24	8,21	8,21	1,1	0,9	1,0	24,11	23,40	24,81
0,45	0,43	0,38	1,78	1,70	1,50	11,53	11,48	11,37	8,25	8,28	8,34	0,8	1,0	0,9	25,52	24,81	24,12
0,51	0,49	0,50	2,01	1,90	1,97	11,26	11,23	11,17	8,33	8,31	8,26	1,0	1,2	1,1	26,94	26,23	25,52

- Dados experimentais obtidos em triplicata para a água deionizada com *E. coli*

I ₁	I ₂	I ₃	J ₁	J ₂	J ₃	k ₁	k ₁	k ₃	pH ₁	pH ₂	pH ₃	T ₁	T ₂	T ₃	Cl ₁	Cl ₂	Cl ₃	<i>E. coli</i> ₁	<i>E. coli</i> ₂	<i>E. coli</i> ₃
0,07	0,05	0,03	0,28	0,20	0,12	7,71	7,60	7,76	6,62	6,68	6,65	0,77	0,74	0,77	21,98	21,98	21,27	1100	1000	1300
0,15	0,11	0,10	0,59	0,43	0,39	8,70	8,75	8,74	6,87	6,80	6,79	0,70	0,67	0,70	22,69	21,98	21,27	1000	980	930
0,23	0,20	0,20	0,91	0,79	0,79	9,66	9,60	9,60	7,01	7,04	7,10	0,67	0,60	0,62	23,40	21,98	22,69	960	910	930
0,34	0,32	0,30	1,34	1,26	1,18	9,94	9,86	9,84	7,08	7,06	7,10	0,64	0,62	0,60	24,82	23,40	24,11	930	900	800
0,43	0,39	0,38	1,70	1,54	1,50	11,51	11,58	11,56	7,29	7,33	7,31	0,48	0,45	0,45	25,52	24,11	24,82	870	780	760
0,50	0,48	0,43	1,97	1,90	1,70	11,10	11,05	10,91	8,23	8,21	8,16	0,40	0,38	0,33	25,52	26,94	25,52	840	720	740

- Dados experimentais obtidos em triplicata para a solução de NaCl sem *E. coli*

I ₁	I ₂	I ₃	J ₁	J ₂	J ₃	k ₁	k ₁	k ₃	pH ₁	pH ₂	pH ₃	T ₁	T ₂	T ₃	Cor ₁	Cor ₂	Cor ₃	Cl ₁	Cl ₂	Cl ₃
0,34	0,31	0,25	1,34	1,20	0,99	806	804	802	9,35	9,30	9,28	1,75	1,74	1,61	0	0	0	263,04	265,17	263,74
0,63	0,60	0,60	2,49	2,40	2,37	804	802	797	9,12	9,10	9,05	2,52	2,50	2,48	0	0	0	265,88	265,17	265,17
0,87	0,82	0,83	3,43	3,20	3,28	804	803	802	9,60	9,58	9,56	4,00	3,88	3,52	0	0	0	267,29	265,88	265,17
1,09	1,07	1,02	4,30	4,20	4,03	815	813	817	9,80	9,80	9,77	4,80	4,30	4,40	0	0	0	269,42	270,84	265,17
1,34	1,32	1,33	5,29	5,20	5,25	816	811	815	9,32	9,31	9,27	4,40	4,40	4,10	0	0	0	264,46	265,88	265,17
1,50	1,43	1,45	5,92	5,60	5,72	813	810	807	9,55	9,50	9,51	4,20	4,10	4,00	0	0	0	265,17	267,29	266,58
1,76	1,74	1,72	6,95	6,90	6,79	815	817	816	9,66	9,62	9,61	4,70	4,50	4,30	0	0	0	263,75	263,04	264,46
2,01	1,98	1,92	7,94	7,80	7,58	808	805	805	9,40	9,38	9,36	5,80	5,20	5,20	3	2	4	266,58	265,88	265,17
2,27	2,25	2,17	8,97	8,90	8,57	806	807	811	8,90	8,86	8,85	6,35	6,30	6,25	7	5	6	264,46	266,58	265,17
2,58	2,54	2,47	10,19	10,00	9,76	809	805	807	8,67	8,61	8,61	6,00	5,90	5,80	7	6	5	268,71	267,29	266,58
2,79	2,75	2,71	11,02	10,90	10,70	810	808	809	8,45	8,40	8,35	6,00	5,60	5,80	8	5	5	269,42	270,84	271,55
3,03	2,99	2,92	11,97	11,80	11,53	805	804	800	8,65	8,64	8,63	8,54	8,50	8,46	14	13	12	274,38	275,09	273,67

- Dados experimentais obtidos em triplicata para a solução de NaCl com *E. coli*

I ₁	I ₂	I ₃	J ₁	J ₂	J ₃	k ₁	k ₁	k ₃	pH ₁	pH ₂	pH ₃	T ₁	T ₂	T ₃	Cor ₁	Cor ₂	Cor ₃	Cl ₁	Cl ₂	Cl ₃	E. coli1	E. coli2	E. coli3
0,33	0,30	0,27	1,30	1,18	1,07	844	844	841	7,80	7,76	7,72	0,44	0,37	0,33	0	0	0	304,87	307,00	302,74	320	370	290
0,67	0,65	0,63	2,65	2,57	2,49	841	840	839	7,94	7,90	7,89	4,00	3,40	3,70	0	0	0	307,71	305,58	304,87	240	200	230
1,00	0,97	0,94	3,95	3,83	3,71	846	845	844	8,31	8,27	8,20	7,10	4,20	4,00	9	11	10	308,41	309,83	307,71	200	220	190
1,12	1,09	1,06	4,42	4,30	4,19	853	853	850	9,83	9,77	9,77	4,60	4,40	4,50	0	0	0	310,54	305,58	307,71	180	160	140
1,31	1,29	1,27	5,17	5,09	5,01	851	850	849	9,34	9,31	9,25	4,37	4,30	4,23	0	0	0	304,87	302,74	302,04	130	110	140
1,60	1,56	1,49	6,32	6,16	5,88	847	843	842	9,60	9,51	9,45	4,30	4,10	3,90	0	0	0	303,45	305,58	304,87	110	90	100
1,94	1,91	1,85	7,66	7,54	7,30	844	840	836	9,66	9,62	9,61	4,40	4,70	4,40	0	0	0	307,00	306,71	304,87	60	40	70
2,42	2,38	2,34	9,56	9,39	9,24	843	840	840	9,42	9,37	9,35	5,00	5,70	5,50	4	2	3	304,87	305,58	307,00	0	0	0
3,05	3,00	2,98	12,05	11,84	11,77	849	843	843	8,91	8,89	8,81	6,80	6,10	6,00	8	5	5	301,32	303,45	302,04	0	0	0

- Dados experimentais obtidos em triplicata para a água de abastecimento público sem *E. coli*

I ₁	I ₂	I ₃	J ₁	J ₂	J ₃	k ₁	k ₁	k ₃	pH ₁	pH ₂	pH ₃	T ₁	T ₂	T ₃	Cor ₁	Cor ₂	Cor ₃	Cl ₁	Cl ₂	Cl ₃
0,23	0,20	0,20	0,91	0,79	0,79	584,20	582,00	581,60	8,22	8,14	8,00	3,60	4,10	4,00	10	9	11	160,94	165,20	162,36
0,49	0,45	0,44	1,93	1,78	1,74	585,00	583,40	585,10	8,49	8,43	8,43	4,90	4,50	4,40	11	8	11	159,53	158,11	161,65
0,68	0,65	0,62	2,69	2,57	2,45	576,30	572,60	572,80	8,73	8,70	8,70	8,46	8,40	8,34	21	22	23	161,65	160,94	163,07
0,87	0,85	0,83	3,43	3,36	3,28	579,10	573,70	572,80	8,77	8,71	8,74	11,40	11,80	11,60	23	24	25	160,23	165,20	161,65
1,10	1,04	1,01	4,34	4,11	3,99	575,70	572,90	569,20	8,67	8,66	8,74	15,00	16,20	14,70	28	30	29	159,52	158,11	160,23
1,26	1,23	1,17	4,98	4,86	4,62	585,00	586,70	584,20	8,44	8,47	8,44	14,50	14,40	15,20	30	29	34	159,52	160,23	158,11
1,55	1,51	1,47	6,12	5,96	5,81	584,10	580,00	582,50	8,49	8,42	8,47	15,10	15,50	15,30	28	30	29	161,65	163,78	164,49
1,71	1,66	1,64	6,75	6,56	6,48	587,30	590,40	589,30	8,46	8,47	8,48	13,80	14,04	14,46	28	26	27	160,94	165,20	163,07

1,83	1,80	1,77	7,22	7,11	6,99	581,70	580,10	580,00	8,63	8,60	8,60	12,00	11,60	11,50	21	23	22	158,11	160,94	161,65
2,07	2,04	1,98	8,17	8,06	7,82	580,80	577,20	578,40	8,66	8,69	8,69	10,21	9,08	11,01	22	21	20	160,23	162,36	159,52
2,28	2,23	2,21	9,00	8,81	8,73	582,60	579,10	584,00	8,74	8,70	8,69	11,30	11,10	11,20	26	28	27	160,94	160,23	165,20
2,46	2,42	2,41	9,72	9,56	9,52	582,30	884,10	282,60	8,92	8,94	8,90	21,20	20,00	21,20	43	40	43	158,11	160,23	161,65
2,57	2,56	2,55	10,15	10,11	10,07	582,90	579,20	581,20	8,72	8,74	8,73	16,50	16,60	16,40	31	32	30	158,11	159,52	161,65
2,66	2,65	2,64	10,51	10,47	10,43	580,00	575,40	575,90	8,90	8,80	8,94	15,30	15,60	15,60	33	30	30	155,98	161,65	159,53
2,93	2,85	2,83	11,57	11,26	11,18	581,50	578,80	577,30	8,82	8,69	8,89	18,80	18,30	18,70	38	40	39	160,94	165,20	162,36

- Dados experimentais obtidos em triplicata para a água de abastecimento público com *E. coli* (10^3 UFC.mL⁻¹)

l_1	l_2	l_3	J_1	J_2	J_3	k_1	k_1	k_3	pH ₁	pH ₂	pH ₃	T ₁	T ₂	T ₃	Cor ₁	Cor ₂	Cor ₃	Cl ₁	Cl ₂	Cl ₃	E. coli1	E. coli2	E. coli3
0,19	0,18	0,17	0,75	0,71	0,67	620,3	619,6	615,0	7,45	7,40	7,38	2,42	2,38	2,40	4	5	3	165,20	166,62	164,49	960	900	940
0,40	0,39	0,35	1,58	1,54	1,38	625,7	623,4	623,5	7,49	7,46	7,49	2,77	2,60	2,73	6	7	5	163,78	162,36	161,23	870	830	900
0,63	0,59	0,58	2,49	2,33	2,29	615,9	613,5	610,5	8,17	8,13	8,15	4,70	4,80	4,60	9	10	11	163,07	160,94	163,78	770	800	730
0,84	0,80	0,76	3,17	3,16	3,00	611,1	608,2	606,8	8,35	8,31	8,33	9,10	9,20	8,70	16	16	19	162,36	161,65	164,49	690	630	610
0,95	0,91	0,87	3,75	3,59	3,44	603,0	601,8	599,1	8,30	8,27	8,27	11,20	11,10	11,90	22	23	24	161,65	163,78	162,36	630	660	590
1,00	0,97	0,94	3,95	3,83	3,71	611,0	610,3	606,3	8,27	8,21	8,15	12,20	12,10	12,90	24	25	23	160,94	159,52	161,65	600	550	510
1,17	1,14	1,11	4,62	4,50	4,38	610,4	608,9	608,6	8,13	8,00	8,17	14,80	14,70	14,60	25	27	26	163,78	166,62	158,11	540	500	490
1,31	1,26	1,24	5,17	4,97	4,90	617,2	618,4	618,1	8,11	8,09	8,10	16,00	16,20	16,10	31	29	30	163,07	165,91	162,36	480	420	400
1,44	1,40	1,39	5,69	5,53	5,49	604,9	605,0	606,3	8,21	8,16	8,14	18,00	18,20	18,10	31	30	32	160,94	164,49	159,52	420	380	390
1,63	1,62	1,61	6,44	6,40	6,36	616,1	615,2	611,9	8,14	8,11	8,08	13,10	13,40	13,70	26	24	22	163,78	161,23	163,07	300	240	270
2,04	1,99	1,97	8,07	7,86	7,78	603,7	602,4	603,2	8,17	8,14	8,14	14,60	14,80	15,30	25	27	26	162,36	163,78	159,52	150	100	80
2,53	2,51	2,49	9,99	9,91	9,83	611,9	612,3	610,9	8,16	8,15	8,14	13,50	13,30	13,40	26	24	22	161,65	162,36	164,49	0	0	0
2,86	2,81	2,76	11,30	11,10	10,9	609,1	608,2	605,5	8,30	8,26	8,28	15,00	15,40	15,20	40	42	41	160,23	158,11	166,62	0	0	0
3,03	2,96	2,89	11,97	11,69	11,41	605,7	603,8	604,9	8,45	8,40	8,35	16,40	17,00	16,70	35	36	37	162,36	163,07	168,03	0	0	0

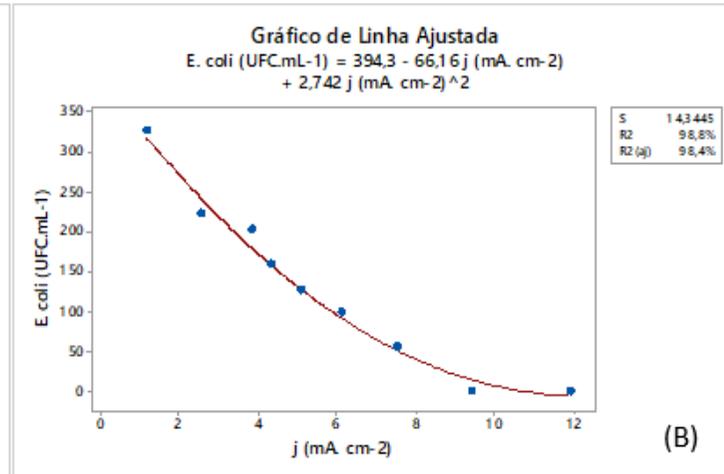
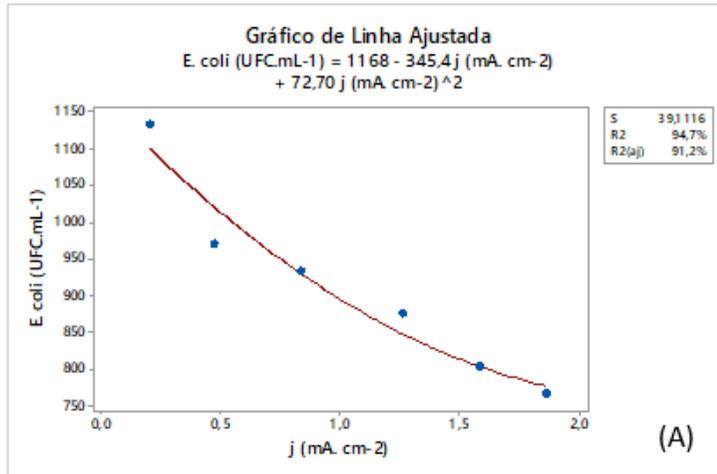
- Dados experimentais obtidos em triplicata para a água de abastecimento público com *E. coli* (10^5 UFC.mL⁻¹)

I ₁	I ₂	I ₃	J ₁	J ₂	J ₃	k ₁	k ₁	k ₃	pH ₁	pH ₂	pH ₃	T ₁	T ₂	T ₃	Cor ₁	Cor ₂	Cor ₃	Cl ₁	Cl ₂	Cl ₃	E. coli1	E. coli2	E. coli3
0,26	0,24	0,21	1,03	0,95	0,83	667,3	665,1	667,0	7,64	7,67	7,65	3,1	3,4	3,2	9	7	8	169,5	167,3	165,2	91000	86000	89000
0,48	0,47	0,45	1,90	1,86	1,78	670,0	671,2	671,8	7,68	7,70	7,72	3,8	3,5	3,5	10	9	10	166,6	169,5	167,2	83000	77000	81000
0,71	0,71	0,67	2,80	2,80	2,65	664,2	665,5	664,7	8,15	8,14	8,10	7,6	7,4	7,2	20	21	21	165,2	166,6	164,5	67000	61000	63000
0,89	0,85	0,82	3,51	3,35	3,24	660,5	661,0	660,8	8,38	8,35	8,40	10,3	10,1	9,6	21	21	22	165,9	165,2	165,2	46000	50000	42000
1,08	1,06	1,02	4,27	4,19	4,03	662,3	661,7	662,1	8,35	8,37	8,35	14,1	13,5	13,7	26	25	27	168,0	165,9	166,6	31000	37000	40000
1,27	1,23	1,2	5,02	4,86	4,74	655,1	655,6	654,4	8,29	8,31	8,29	14,7	14,2	13,8	26	28	28	166,6	168,0	169,5	22000	20000	26000
1,55	1,54	1,52	6,12	6,08	6,00	661,4	662,4	663,1	8,31	8,31	8,27	14,8	14,0	13,6	27	28	27	168,7	166,6	167,3	11000	14000	17000
1,72	1,7	1,66	6,79	6,71	6,56	653,5	656,2	654,9	8,37	8,38	8,35	15,6	14,6	14,8	28	26	25	167,3	168,7	165,9	8100	7500	7900
1,84	1,81	1,77	7,27	7,15	6,99	662,1	663,5	661,9	8,41	8,38	8,40	14,1	13,4	14,5	26	28	27	165,2	167,3	164,5	5200	4600	4900
2,06	2,03	2	8,14	8,02	7,90	661,6	663,6	662,7	8,39	8,36	8,35	15,2	15,1	14,8	27	27	25	168,7	165,2	165,2	2100	1800	2200
2,26	2,22	2,18	8,93	8,77	8,61	667,3	665,6	667,3	8,37	8,38	8,35	11,2	12,7	13,2	27	26	26	167,3	168,7	166,6	1300	1000	1500
2,45	2,41	2,36	9,68	9,51	9,32	655,4	657,1	655,9	8,43	8,42	8,42	18,5	17,6	18,3	36	33	35	165,9	167,3	164,5	900	760	590
2,59	2,56	2,52	10,23	10,11	9,95	653,7	655,2	655,8	8,40	8,43	8,45	17,1	16,3	16,7	30	32	32	166,6	165,9	168,0	500	350	420
2,98	2,95	2,92	11,77	11,65	11,53	660,8	661,8	662,4	8,36	8,38	8,35	18,8	17,6	17,1	37	39	36	164,5	166,6	165,9	53	48	41

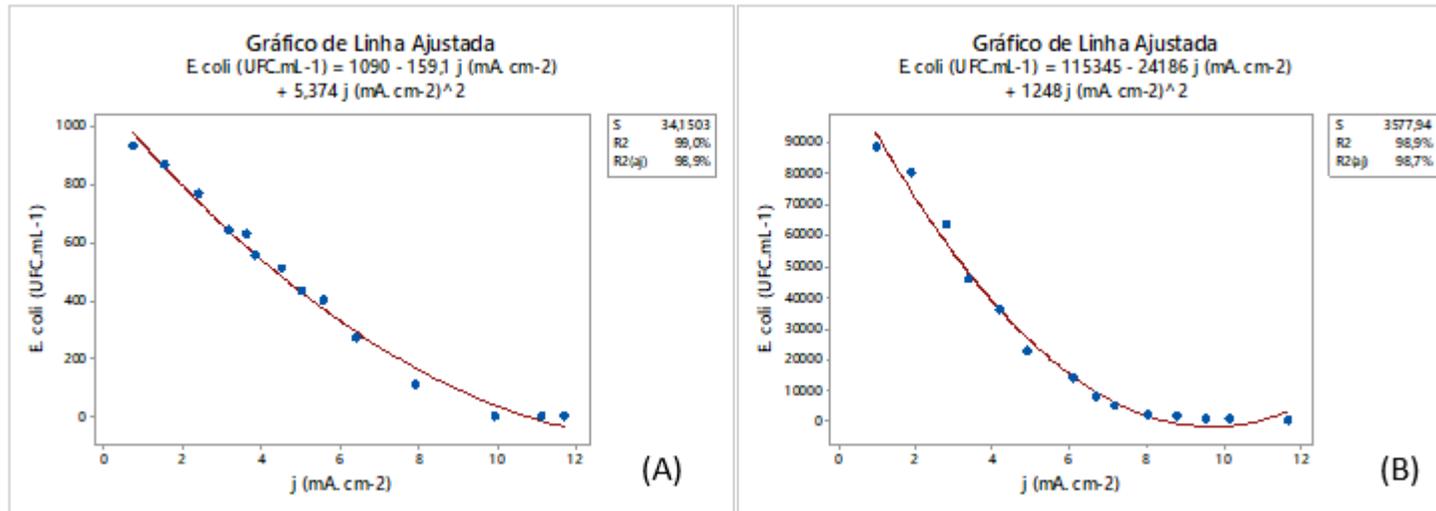
APÊNDICE E – Análises de variabilidade de dados e de resíduos, considerando a probabilidade normal, de contagem de *E. coli* em função das densidades de corrente aplicadas, para as águas contaminadas com *E. coli* consideradas nesse trabalho.

A análise de variabilidade de dados referentes a desinfecção de *E. coli* em função das densidades de corrente aplicadas ao sistema para as águas de alimentação: deionizada, solução de NaCl e de abastecimento público local (10^3 UFC.mL⁻¹ e 10^5 UFC.mL⁻¹), iniciou-se com o ajuste dos dados experimentais do número de colônias de *E. coli* versus densidades de corrente ao modelo quadrático. Dessa forma, a seguir são apresentados os comportamentos desses dados em relação ao ajuste nas respectivas águas de alimentação consideradas.

- Ajuste das respostas de *E. coli* em função das densidades de correntes ao modelo quadrático para a água deionizada (A) e solução de NaCl (B).



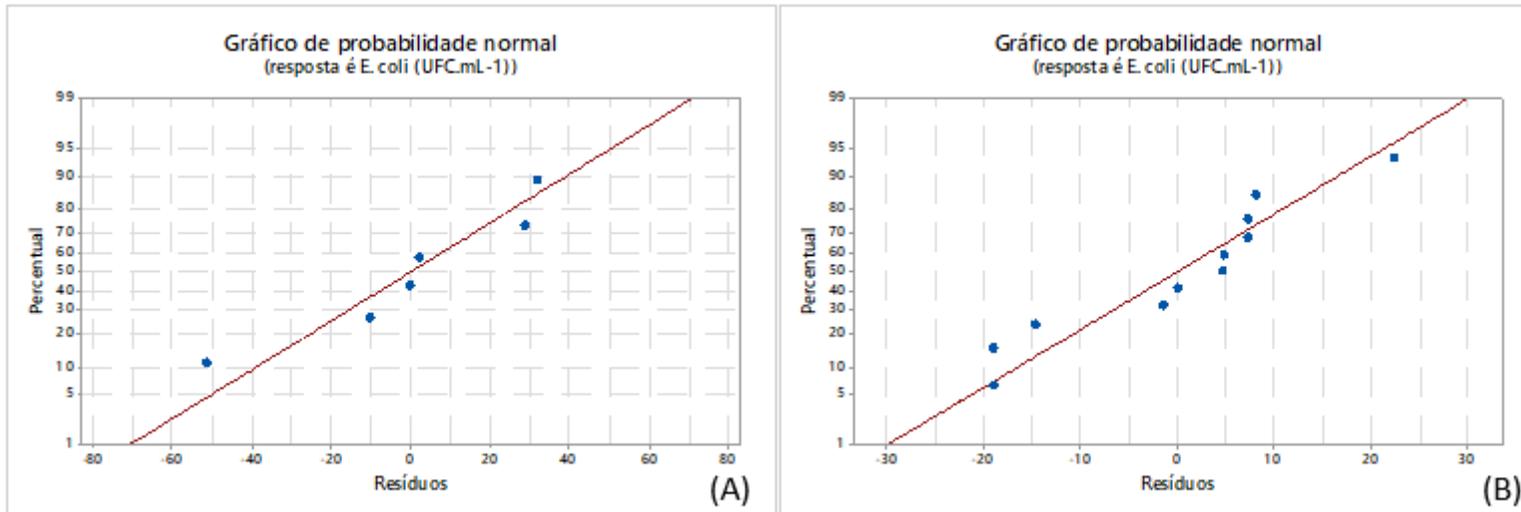
- Ajuste das respostas de *E. coli* em função das densidades de correntes ao modelo quadrático para as águas de abastecimento (10^3 (A) e 10^5 (B) UFC.mL⁻¹)



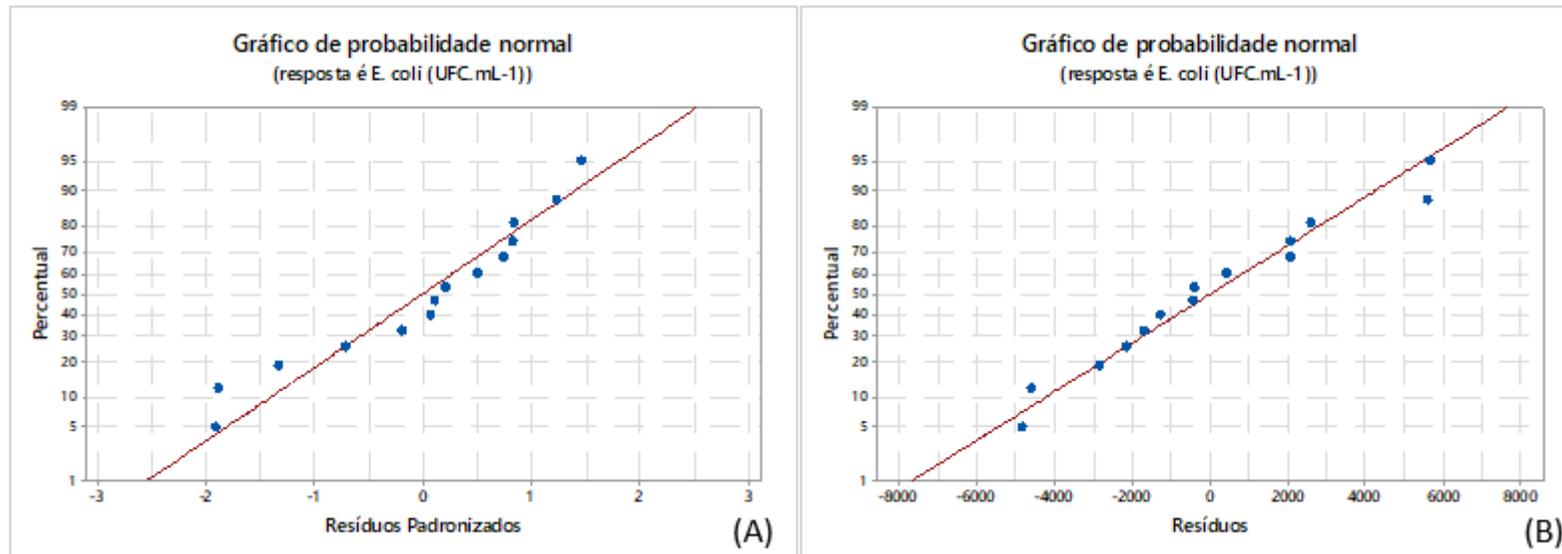
A análise das figuras apresentadas, associadas aos valores dos coeficientes de determinação R^2 mostraram que, de forma geral, os dados experimentais se ajustaram de forma adequada ao modelo quadrático escolhido para representação dos mesmos. Dessa forma, para a água deionizada, solução de NaCl e as águas de abastecimento público nas duas ordens de concentração de *E. coli*, foi possível explicar, respectivamente, 94,7%, 98,8%, 99,0% e 98,7% da variabilidade total dos dados de *E. coli* em função das densidades de corrente, pelo modelo adotado.

Em se tratando dos resíduos dos dados, para verificar a pressuposição de que esses são distribuídos de forma normal, fez-se o estudo da probabilidade normal dos resíduos das respostas do número de colônias de *E. coli* em função das densidades de corrente para cada tipo de água de alimentação, os quais são ilustrados como segue.

- Análise de resíduos de dados para a probabilidade normal para a água deionizada (A) e solução de NaCl (B)



- Análise de resíduos de dados para a probabilidade normal para as águas de abastecimento (10^3 (A) e 10^5 (B) UFC.mL⁻¹)



A análise de resíduos para os dados experimentais referentes às águas de alimentação do sistema, mostraram, de forma geral, uma distribuição normal dos mesmos, de forma homogênea, em torno da linha de tendência de regressão linear, caracterizando as distribuições normais para os respectivos dados.