



UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-SP 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

William Heiji Ramos de Aguiar

Análise de Viabilidade Técnica e Econômica do Processo de Desinfecção de uma Estação de Tratamento de Esgoto por Processo Eletrolítico em Escala Real

Taubaté – SP
2019

William Heiji Ramos de Aguiar

Análise de Viabilidade Técnica e Econômica do Processo de Desinfecção de uma Estação de Tratamento de Esgoto por Processo Eletrolítico em Escala Real

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Mauro Pedro Peres

Taubaté
2019

SIBi - Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

A282a Aguiar, William Heiji Ramos de
Análise de viabilidade técnica e econômica do processo de
desinfecção de uma estação de tratamento de esgoto por processo
eletrolítico em escala real / William Heiji Ramos de Aguiar. – 2019.
50f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento
de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Mauro Pedro Peres, Departamento do Instituto
Básico de Ciências Exatas.

Coorientação: Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino, Departamento de
Engenharia Mecânica.

1. Desinfecção. 2. Esgoto. 3. Processo eletrolítico. I. Graduação em
Engenharia Elétrica e Eletrônica. III. Título.

CDD 628.3



Universidade de Taubaté
Autarquia Municipal de Regime Especial
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP
CNPJ 45.176.153/0001-22

Departamento de Engenharia Elétrica
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi
Taubaté-Sp 12060-440
Tel.: (12) 3625-4190
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DO PROCESSO DE
DESINFECÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO POR PROCESSO
ELETROLÍTICO EM ESCALA REAL**

WILLIAM HEIJI RAMOS DE AGUIAR

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “GRADUADO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA”

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. MAURO PEDRO PERES
Orientador/UNITAU-DEE

Prof. Dr. MÁRCIO ABUD MARCELINO
Coorientador/UNITAU-DEE

Prof.ª Dra. ÉRICA JOSIANE COELHO GOUVÊA
Membro Externo

dezembro de 2019

De modo especial, à minha família, que com seu apoio, foi a grande incentivadora para que eu continuasse no curso.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos.

Ao meu orientador e coorientador, *Prof. Dr. Mauro Pedro Peres* e *Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino* que sem as suas orientações, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

Aos meus pais, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

À Aratú Ambiental Ltda., em particular na pessoa do diretor da área ambiental Vinicius de Lima Nunes, por disponibilizar seu laboratório para realizar os estudos de caso e principalmente pela colaboração na solução de dúvidas pertinentes ao estudo.

“É capaz quem pensa que é capaz.”

Buda

de AGUIAR, W. H. R. **Análise de viabilidade técnica e econômica do processo de desinfecção de uma estação de tratamento de esgoto por processo eletrolítico em escala real.** 2019. 50 f. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2019.

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo da tecnologia de desinfecção de efluente, sem o uso de produtos químicos, em um processo que opere em fluxo contínuo de baixa vazão, buscando a desinfecção por filetes e não por batelada, pretendendo atingir uma desinfecção mínima, para que o efluente possa ser descartado em um corpo d'água. A tecnologia estudada foi o processo eletrolítico que causa a desinfecção através da eletroflotação, eletrocoagulação e eletrooxidação, que ocorrem durante a eletrólise da água residuária. Foi desenvolvido um protótipo de uma célula eletrolítica, a nível de bancada, com eletrodos de alumínio, e, o efluente para os testes foi coletada nos tanques de decantação da Sabesp. Para a coleta de dados, foi utilizado o Colipaper para quantizar as colônias de coliforme fecais, um voltímetro, amperímetro e um cronômetro, para as medidas de tempo, vazão e potência da célula. Os resultados dos testes levaram a conclusão de que o design do protótipo desenvolvido obteve sucesso na desinfecção do efluente e é possível diminuir o tempo de detenção hídrica da célula resultando num gasto de energia menor, com um nível de desinfecção dentro das normas vigentes.

PALAVRAS-CHAVE: Desinfecção. Esgoto. Processo eletrolítico.

de AGUIAR, W. H. R. **Technical and economic viability analysis of the disinfection process of a sewage treatment station with real scale electrolytic process.** 2019. 50 f. Graduate Work in Electrical Engineering – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2019.

ABSTRACT

This study presents the study of effluent disinfection technology, without the use of chemical products, in a process that operates in a continuous flow of low flow, seeking the disinfection by fillets and not by batch, aiming to achieve a minimum disinfection, so that the effluent can be discharged into a water body. The technology studied was the electrolytic process that causes disinfection through electroflotation, electrocoagulation and electrooxidation, which occur during the electrolysis of wastewater. A prototype of an electrolytic cell was developed, at the bench level, with aluminum electrodes, and the effluent for the tests was collected in the Sabesp decantation tanks. For data collection, the Colipaper was used to quantify the fecal coliform colonies, a voltmeter, an ammeter and a stopwatch, for the measurements of time, flow and power of the cell. The results of the tests led to the conclusion that the design of the developed prototype was successful in disinfecting the effluent and it is possible to reduce the time of water detention of the cell resulting in a lower energy expenditure, with a level of disinfection within the current standards.

KEYWORDS: Disinfection. Water Waste. Electrolytic Process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tratamento primário e secundário do efluente	15
Figura 2 – Espectro Eletromagnético	22
Figura 3 – Eletrólise do cloreto de sódio fundido	24
Figura 4 - Tempo de eletrólise x remoção de DQO em função da densidade de corrente	28
Figura 5 – Representação do fluxo do efluente (vista lateral do protótipo)	32
Figura 6 – Protótipo desenvolvido	32
Figura 7 – Efluente coletado no tanque de decantação	33
Figura 8 – Tratamento anaeróbio, aeróbio e anóxico de efluente	35
Figura 9 – Amostra de referência após incubação.....	36
Figura 10 – Amostras A1 e A2 após incubação	37
Figura 11 – Amostras A3, A4 após incubação	37
Figura 12 - Amostras A5 e A6 após incubação	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites Máximos de Coliformes Termotolerantes das Águas	19
Tabela 2 – Valores dos Parâmetros	38
Tabela 3 – Coliformes Totais	39
Tabela 4 – Vazão e Potência Consumida	40
Tabela 5 – Vazão e Potência Consumida por hora	41
Tabela 6 – Custo de Operação	41

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação e Destinos das Águas Doces.....	17
Quadro 2 – Classificação e Destinos das Águas Salinas	18
Quadro 3 – Classificação e Destinos das Águas Salobras.....	18

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CIP	Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EC	Eletrocoagulação
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
PIS	Programa de Integração Social
PP	Polipropileno
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
TDH	Tempo de Detenção Hídrica
TE	Tarifa de Energia
THM	Trihalometanos
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
UFC	Unidade de Formação de Colônia
UV	Radiação Ultravioleta

LISTA DE SÍMBOLOS

Col./100ml	Coliformes Termotolerantes por 100 mililitros
O ₃	Gás Ozônio
Cl ₂	Cloro Gasoso
H ₂ O	Água
HClO	Ácido Hipocloroso
H ₃ O ⁺	Hidroxônio
Cl ⁻	Íon Cloreto
ClO ⁻	Íon Hipoclorito
pH	Potencial Hidrogeniônico
OH	Hidroxila
e ⁻	Elétron
Na ⁺	Íon Sódio
Na	Sódio
A/m ²	Ampère por Metro Quadrado
Fe ²⁺	Ferro II
Fe ³⁺	Ferro III
°C	Grau Celsius
NaCl	Cloreto de Sódio
P	Potência
U	Potencial
i	Corrente Aplicada na Eletrólise
Q	Vazão
kWh/m ³	Quilowatt-hora por Metro Cúbico
V	Volt
A	Ampère
m ³ /h	Metro Cúbico por Hora
cm	Centímetro
l	Litro
min	Minuto
s	Segundo
V _{DC}	Tensão Média
mA/cm ²	Miliampère por Centímetro Quadrado

UFC/100ml	Unidade De Formação de Colônia por 100 Mililitros
l/min	Litro por Minuto
kWmin/l	Quilowatt-minuto por Litro
kWh	Quilowatt-hora
R\$/kWh	Reais por Quilowatt-hora
R\$	Reais
l/h	Litro por Hora
kWh/l	Quilowatt-hora por Litro
kWh/mês	Quilowatt-hora por Mês
R\$/mês	Reais por Mês

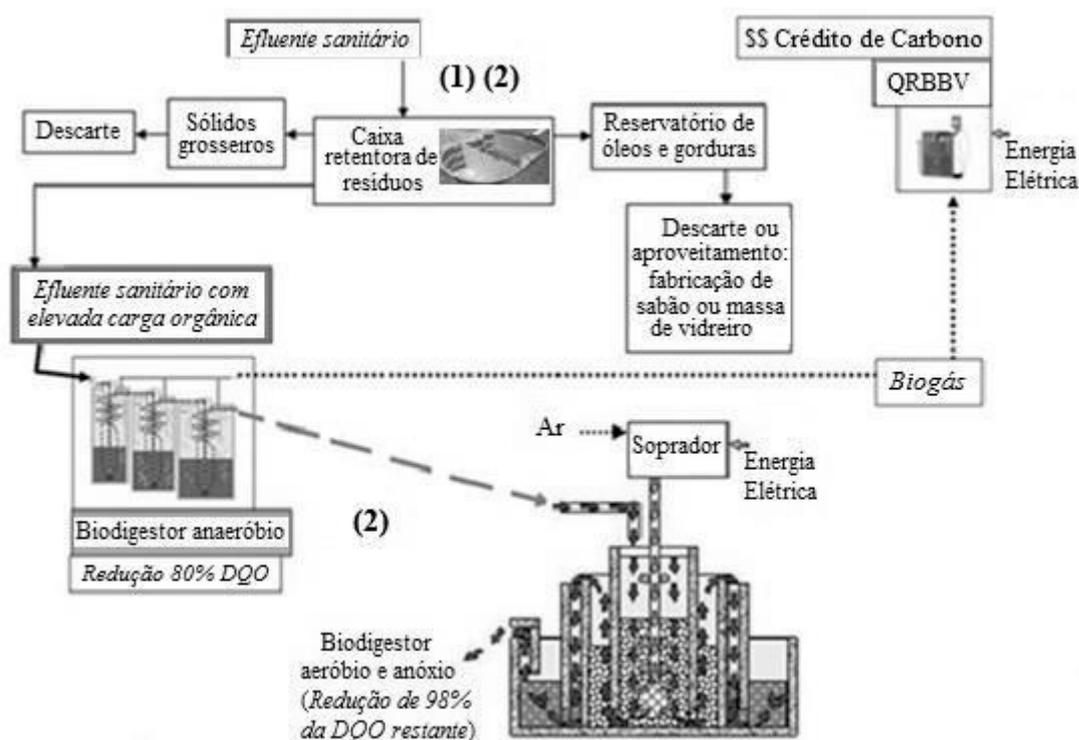
SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO	16
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 LEGISLAÇÃO VIGENTE	17
2.2 TÉCNICAS DE DESINFECÇÃO	19
2.2.1 Técnica com cloração	20
2.2.2 Ozônio	21
2.2.3 Radiação ultravioleta	22
2.2.4 Processo eletrolítico	24
2.2.4.1 Processo eletrolítico no tratamento de efluentes	25
2.2.4.2 Parâmetros que influenciam o processo de eletrocoagulação	26
2.2.4.2.1 Densidade de corrente	26
2.2.4.2.2 Materiais e espaçamento dos eletrodos	26
2.2.4.2.3 Tempo de permanência na célula	27
2.2.4.2.4 Temperatura	28
2.2.4.2.5 pH do efluente	29
2.2.4.2.6 Concentração de eletrólitos	29
2.2.4.3 Reator eletrolítico	30
2.2.4.4 Vantagens e desvantagens da EC	31
3 METODOLOGIA	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
4.1 TESTES E DADOS	35
4.1.1 Consumo energético	40
5 CONCLUSÃO	42
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO

Segundo o Diagnóstico Nacional dos Serviços de Água e Esgoto (BRASIL, 2017), 46,0% da vazão de esgoto gerada no país é tratada. Este tratamento, que é realizado nas Estações de Efluentes, pode variar de acordo com a região, porém, certas etapas do processo de tratamento são iguais como o tratamento primário (1) e o secundário (2), como mostra a Figura 1.

Figura 1 - Tratamento primário e secundário do efluente



Fonte: Adaptado de GODOY Jr. (2003).

No tratamento primário o esgoto bruto atravessa grades de diversos tamanhos, que retêm os materiais presentes, na sequência, ocorre a remoção da areia contida no esgoto, já o tratamento secundário, o esgoto passa por um processo de decantação e aeração que acarreta na separação de sedimentos, gorduras e óleos e o esgoto tem suas demandas bioquímica e química de oxigênio reduzidas (MONTESANTI, 2018).

O efluente, após ter suas demandas bioquímica e química de oxigênio reduzidas, passa por um processo de desinfecção, para redução de patógenos e assim ser lançado em corpo d'água, de acordo com as legislações vigentes. Nessa etapa o cloro em forma gasosa é comumente utilizado, por questões de custo, porém ao reagir com a matéria orgânica forma trihalometanos que são produtos altamente cancerígenos.

A utilização de processo eletrolítico é um dos métodos que objetiva viabilizar a desinfecção. As reações químicas formadas a partir do processo eletrolítico são capazes de desinfetar de forma eficiente o efluente a ser tratado, sem gerar resíduos cancerígenos e sem prejudicar o meio ambiente.

Porém é necessário que se conheça as exigências legais, com o objetivo de assegurar a qualidade e padrões físicos, químicos e biológicos do efluente, para evitar a alteração da carga patogênica do meio com o despejo do efluente tratado.

Este trabalho apresenta o estudo da tecnologia de desinfecção de efluente, sem o uso de produtos químicos, em fluxo contínuo por filetes d'água de baixa vazão, para atingir uma desinfecção mínima, buscando níveis de potabilidade dentro das legislações vigentes.

1.1 OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é o conhecimento da tecnologia de desinfecção e pós-tratamento de efluente de esgoto sanitário, para promover a redução de patógenos da água residuária, utilizando processo eletrolítico que opere em fluxo contínuo de baixa vazão.

O grande diferencial é a redução de patógenos até atingir desinfecção mínima, sem utilização de produtos químicos, uma vez que, o cloro gasoso, utilizado para a desinfecção da água, em contato com matérias orgânicas forma trihalometanos, que são produtos cancerígenos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é desenvolvido em 5 capítulos, onde no capítulo 1 é apresentado uma introdução sobre o tratamento de esgoto no Brasil e os objetivos do trabalho apresentado. O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, que levanta alguns processos de desinfecção de efluentes e as tecnologias envolvidas no processo eletrolítico, foco deste trabalho.

No capítulo 3 é abordado a metodologia utilizada para a realização dos objetivos apresentados na introdução. O capítulo 4 são os resultados e discussões a respeito dos assuntos tratados no trabalho, em especial os tratados na metodologia. Por fim o capítulo 5 é apresentado as conclusões do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Foi realizado um levantamento bibliográfico sobre os diversos assuntos que envolve este trabalho, tais como as principais técnicas de tratamento de efluentes sanitários, um estudo detalhado do processo eletrolítico e quanto à legislação para uma desinfecção mínima.

2.1 LEGISLAÇÃO VIGENTE

No Brasil, a desinfecção de efluentes sanitários é exigida por lei através das Resoluções nº 357/2005 e 430/2011, do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). A Resolução nº 357 dispõe sobre a classificação de corpos d'água, diretrizes para seu enquadramento e as condições e padrões de lançamentos de efluentes, enquanto a Resolução nº430 dispõe condições, parâmetros, padrões e diretrizes de gestão do lançamento de efluentes em corpos de água receptores, complementando e alterando parcialmente a resolução anterior.

A Resolução nº 357 classifica as águas em doces, salobras e salinas, onde:

- Água doce são as águas com salinidade igual ou inferior a 0,5%;
- Água salobra são as águas com uma salinidade superior a 0,5% e inferior a 30%;
- Água salina são as águas com uma salinidade superior a 30%;

Dentro dessas classificações as águas são destinadas segundo a qualidade requerida para seus respectivos usos, em treze classes de qualidade, como mostra os Quadros 1, 2 e 3. (CONAMA, 2005).

Quadro 1 – Classificação e Destinos das Águas Doces

Classes	Destinos
Especial	Abastecimento para consumo humano, com desinfecção; Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas; Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
1	Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado; Proteção das comunidades aquáticas e comunidades aquáticas em Terras Indígenas; Recreação de contato primário; Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e frutas que se desenvolvem rentes ao solo e que sejam consumidas cruas sem remoção de película;
2	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional; Proteção das comunidades aquáticas; Recreação de contato primário; Irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa ter contato direto;

	Aquicultura e atividade de pesca.
3	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; Pesca amadora; Recreação de contato secundário; Dessedentação de animais.
4	Navegação; Harmonia paisagística.

Fonte: Adaptado da Resolução nº 357 (CONAMA, 2005).

Quadro 2 – Classificação e Destinos das Águas Salinas

Classes	Destinos
Especial	Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.
1	Proteção das comunidades aquáticas; Recreação de contato primário; Aquicultura e atividade de pesca.
2	Pesca amadora; Recreação de contato secundário.
3	Navegação; Harmonia paisagística.

Fonte: Adaptado da Resolução nº 357 (CONAMA, 2005).

Quadro 3 – Classificação e Destinos das Águas Salobras

Classes	Destinos
Especial	Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral; Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas.
1	Proteção das comunidades aquáticas; Recreação de contato primário; Aquicultura e atividade de pesca; Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado; Irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e frutas que se desenvolvem rentes ao solo e que sejam consumidas cruas sem remoção de película e irrigação de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa ter contato direto.
2	Pesca amadora; Recreação de contato secundário.
3	Navegação; Harmonia paisagística.

Fonte: Adaptado da Resolução nº 357 (CONAMA, 2005).

A seção II do capítulo III da Resolução nº 357 e a seção II do capítulo II da Resolução nº 430 traz as condições e padrões físicos e químicos, como por exemplo ausência de materiais

flutuantes, cor natural da água, turbidez e níveis aceitáveis de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), necessários para que os efluentes se enquadrem nas classes dispostas anteriormente e possam também ser lançadas diretamente em corpos receptores (CONAMA, 2005; CONAMA, 2011).

Uma das principais condições de qualidade é o limite máximo de coliformes termotolerantes, que é, segundo o artigo 2º do capítulo I da Resolução nº 357, definido como:

Coliformes termotolerantes: bactérias gram-negativas, em forma de bacilos, oxidase-negativas, caracterizadas pela atividade da enzima β -galactosidase. Podem crescer em meios contendo agentes tenso-ativos e fermentar a lactose nas temperaturas de 44° - 45°C, com produção de ácido, gás e aldeído. Além de estarem presentes em fezes humanas e de animais homeotérmicos, ocorrem em solos, plantas ou outras matrizes ambientais que não tenham sido contaminados por material fecal (Resolução CONAMA nº 357, 2005, p.59).

Os limites máximos de coliformes termotolerantes das águas e suas classes de qualidade, exceto pela classe especial e classe 4 que não constam na resolução, são apresentadas pela Tabela 1.

Tabela 1 – Limites Máximos de Coliformes Termotolerantes das Águas

Classes	Limites máximos de Coliformes Termotolerantes (col./100ml)		
	Águas Doces	Águas Salinas	Águas Salobras
1	200	1000	1000
2	1000	2500	2500
3	4000	4000	4000

Fonte: Adaptado da Resolução nº 357 (CONAMA, 2005).

Os limites máximos apresentados na tabela 1 são considerados pela resolução como sendo os casos gerais, onde não ocorre o contato direto da água com o ser humano, ou criação de animais para consumo humano e irrigação de jardins, parques, frutas, hortaliças, etc.

2.2 TÉCNICAS DE DESINFECÇÃO

Gonçalves (2003) destaca a cloração, o ozônio (O₃), o ácido peracético, a radiação ultravioleta (raios UV), radiações ionizantes (por exemplo a radiação gama) e sistemas naturais como disposição em solo, banhados naturais ou artificiais e lagoas de maturação, como processos de desinfecção aplicados no tratamento de efluentes sanitários.

As técnicas tradicionais de desinfecção natural, como lagoas de estabilização, são tidas como ineficientes para a remoção de protozoários, principalmente a *Cryptosporidium* e Giárdia, e, por consequência, para a proteção contra estes patógenos (CARDOSO *et al.*, 2003).

A fim de evitar a extensão desta seção, a seguir serão abordadas apenas as técnicas de cloração, ozônio, radiação ultravioleta e o processo eletrolítico, tema principal deste trabalho.

2.2.1 Técnica com cloração

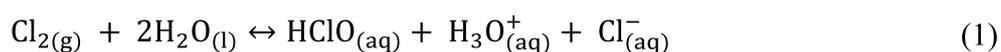
Aisse *et al.* (2003) afirma que os processos de desinfecção por cloração são os mais utilizados em todo o mundo, por conta do extenso domínio desta tecnologia e a viabilidade econômica e operacional de sua aplicação.

A cloração pode ser realizada através da utilização de cloro gasoso, soluções de hipoclorito de sódio ou cálcio e por outros compostos de cloro na forma sólida ou líquida (DIAS, 2001 *apud* U.S.EPA, 1999).

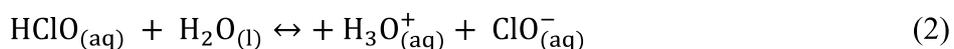
O cloro age de duas formas quando adicionado à água:

- Como desinfetante, destruindo ou inativando os patógenos, algas e bactérias de vida livre;
- Como oxidante de compostos orgânicos e inorgânicos presentes.

A Reação 1 demonstra o que ocorre quando o cloro é adicionado em água.



O ácido hipocloroso (HClO), dependendo do pH da água, pode se ionizar, formando o íon hipoclorito (ClO^-), de acordo com a Reação 2.



Tanto o ácido hipocloroso quanto o íon hipoclorito possuem ação desinfetante e oxidante, porém o ácido hipocloroso é mais eficiente na destruição dos microrganismos em geral (SANCHES *et al.*, 2003).

Os requerimentos para a cloração variam consideravelmente dependendo da qualidade do efluente. Alguns fatores podem afetar a demanda de cloro necessária como, compostos orgânicos, resíduos industriais e quanto a concentração de amônia. Através da melhora nas características de mistura dos contadores de cloro e estratégias de controle do processo a eficácia da cloração pode ser aumentada (DIAS, 2001).

Segundo Sanches *et al.* (2003) a cloração de águas contendo matéria orgânica natural favorece a formação de compostos denominados genericamente de organoclorados, como os trihalometanos (THM). Os compostos organoclorados foram identificados como cancerígenos, mutagênicos e podem ser bioacumulados nas cadeias tróficas.

A fim de minimizar o problema da geração de THM's, se faz necessário o emprego de técnicas de descloração dos efluentes. Podem ser através de mecanismos químicos, como a aplicação de reagentes oxidantes ao efluente desinfetado, dióxido de enxofre por exemplo; ou por mecanismos físicos, fazendo uso da adsorção utilizando carvão ativado, ou por decomposição por ação direta da radiação ultravioleta, natural ou artificial (SALLES, 2008 *apud* AISSE *et al.*, 2003).

2.2.2 Ozônio

O ozônio (O₃) é um gás instável e parcialmente solúvel em água. A temperatura ambiente e em baixas concentrações, se apresenta como um gás incolor, porém em altas concentrações torna-se um gás azulado (BARBOSA, 2016).

Sanches *et al.* (2003) descrevem o ozônio como sendo um potente oxidante, capaz de oxidar compostos orgânicos e inorgânicos na água.

Segundo Sanches *et al.* (2003) o ozônio por meio de mecanismos complexos que envolvem a geração de radicais livres hidroxilas (OH), decompõe-se espontaneamente na água; e os dois mecanismos de sua reação na água são:

- Oxidação direta dos compostos pelo ozônio, em valores de pH neutros ou ácidos;
- Oxidação dos compostos pelos radicais livres hidroxilas produzidos durante a decomposição do ozônio, em valores de pH básicos.

O ozônio para tratamento de águas apresenta a melhor relação custo/benefício como agente desinfetante, porém se tratando de efluentes sanitários, sua aplicação, à vista da demanda excessiva, se torna economicamente inviável, apesar de sua eficiência na desinfecção (SALLES, 2008 *apud* DANIEL *et al.* 2001; *apud* GERH *et al.*, 2003).

Apesar de sua inviabilidade econômica, devido à formação de compostos organoclorados, toxicidade dos efluentes e o custo com o processo de descloração, o ozônio despertou interesse como um substituto à cloração. Além dos problemas da cloração já citados, o ozônio é eficiente quanto à inativação de vírus, bactérias e protozoários, tendo um poder desinfetante de cerca de dez vezes ao do cloro, para todos os tipos de microrganismos (GERH *et al.*, 2003; LAPOLLI *et al.*, 2003).

Moraes (2006) afirma que apesar da alta eficiência de desinfecção do ozônio, ele não deixa residual, desse modo se faz necessário o uso do cloro para atuar como desinfetante residual impedindo qualquer contaminação ao longo das tubulações, que muitas vezes se encontram sujas, enferrujadas e contaminadas.

Sanches *et al.* (2003) apresentam algumas vantagens:

- É um oxidante poderoso e atua rapidamente sobre a matéria orgânica;
- Possui um tempo de meia-vida de alguns minutos, desse modo doses excessivas não apresentam riscos à saúde humana;
- Tem ação desinfetante rápida, cerca de 5 a 10 minutos;
- Pode ser combinado com a pós cloração;

Apresentam também desvantagens, principalmente no Brasil:

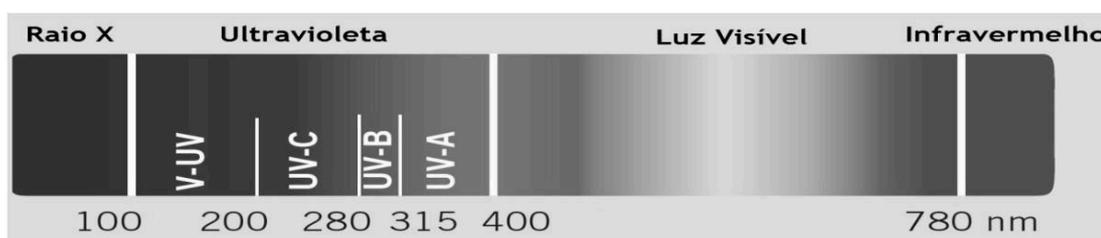
- É um gás venenoso, de odor irritante e sem cor perceptível, o que necessita de mão de obra especializada para sua manipulação;
- Gás instável, sendo necessário a produção e consumo *in loco*;
- Os custos operacionais são altos, em torno de 10 a 15 vezes os da cloração.

2.2.3 Radiação ultravioleta

A radiação ultravioleta ou luz ultravioleta (UV) é definida como uma radiação pertencente à faixa do espectro eletromagnético com um comprimento de onda que vai de 100 a 400 nm, apresentada pela Figura 1, e que pode ser dividida quanto ao comprimento de onda e classificada em relação aos efeitos à saúde humana e meio ambiente em (DIAS, 2001):

- UVC (200-280 nm);
- UVB (280-315 nm);
- UVA (315-400 nm).

Figura 2 – Espectro Eletromagnético



Fonte: SENSOR TECHNOLOGY¹.

¹ Disponível em: < <https://sensor-technology.com.br/index.php/solucoes-em-uv-e-ir/>>. Acessado em: 30 jul. 19.

A faixa germicida de maior efeito é o intervalo de comprimento de onda entre 254 e 285 nm, portanto a faixa UVC é a de maior eficácia para a inativação dos microrganismos (DANIEL, 2001).

No geral, para desinfecção usam-se lâmpadas de vapor de mercúrio como fonte artificial de radiação UV, pois esta apresenta baixo custo, facilidade de funcionamento e eficiência energética (CAVICCHIOLI, 2003).

Por ser um agente físico, a radiação UV não altera as propriedades da água e atua atingindo os ácidos nucléicos dos microrganismos, acarretando na desativação de vírus e bactérias, e sua eficiência de absorção pelos microrganismos está relacionada ao produto do tempo de exposição à luz e a intensidade UV, caracterizando a dose de energia UV disposta (TROJAN, 2010; BARBOSA, 2016).

Segundo Barbosa (2016, *apud* DANIEL, 2001) a determinação da dose correta é importantíssima, pois se a dose de UV for dimensionada incorretamente, há possibilidade de alguns microrganismos se recuperarem.

A eficiência do processo de desinfecção é dependente da qualidade da água, principalmente sua transparência, pois quanto mais transparente for a água maior será a distância que a radiação percorrerá. A presença de partículas na água pode reduzir o processo de inativação, visto que os microrganismos podem se proteger dos raios UV utilizando as partículas como um escudo, resultando em uma concentração residual (METCALF; EDDY, 2004; CHEIS, 2013).

Metcalf e Eddy (2004) apontam algumas das vantagens e desvantagens do processo de desinfecção por radiação UV, para as vantagens tem-se:

- Eficaz para muitos vírus, bactérias e protozoários;
- Não altera a qualidade da água;
- Não produz residual tóxico;
- Maior segurança se comparado aos processos por desinfetantes químicos;
- Requer pouco espaço;

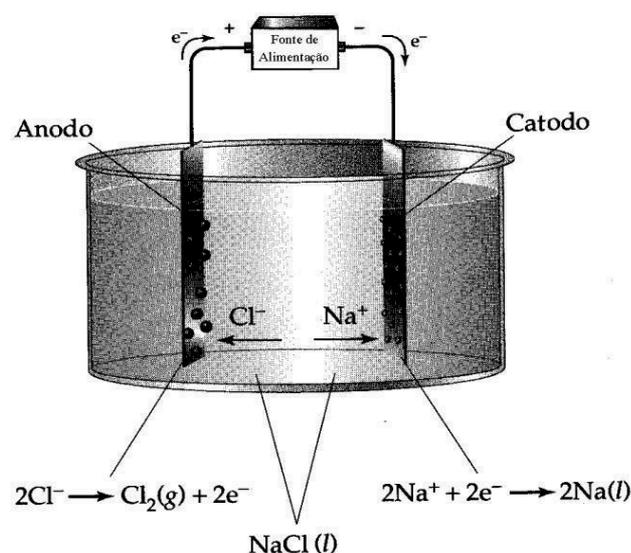
Já para as desvantagens:

- Turbidez da água reduz sua eficiência;
- Necessita de desinfetante residual, como o cloro, para redes de abastecimentos;
- Fornecimento de energia elétrica ininterrupto;
- Necessita de medidas secundárias como leitura de sensores para monitoramento.

2.2.4 Processo eletrolítico

Processo eletrolítico ou eletrólise, é um processo eletroquímico não espontâneo, que requer um sistema em forma de circuito eletroquímico, cujos elementos são os eletrodos, normalmente metálicos, os eletrólitos (íons em solução) e de uma fonte de energia elétrica externa, como mostra a Figura 2.

Figura 3 – Eletrólise do cloreto de sódio fundido



Fonte: SINOTI *et al.* (2005).

Os fenômenos da eletrólise podem ser condensados em duas leis de Faraday, surgidas em 1835, para a eletrólise (WIMMER, 2007 *apud* DENARO, 1974; TICIANELLI, 2005):

1. A quantidade de produto primário formado num eletrodo pela eletrólise é diretamente proporcional à quantidade de eletricidade que passa pela solução.
2. As quantidades de diferentes produtos primários formados num eletrodo pela mesma quantidade de eletricidade são proporcionais as suas massas moleculares relativas, ou massas atômicas relativas, divididas pela variação de seu número de oxidação durante o processo eletrolítico.

A lei de Faraday pode ser usada para relacionar, utilizando-se eletrodos de alumínio, a massa de alumínio gerada eletroliticamente que entra em solução, para uma corrente de operação e um tempo de funcionamento, podendo chegar a quantidade de coagulante entregue à solução (HOLT *et al.*, 2005).

2.2.4.1 Processo eletrolítico no tratamento de efluentes

Kerwick *et al.* (2005) apontaram a desinfecção eletrolítica, direta e indireta, como tendo o maior potencial para substituir a cloração. A principal vantagem do processo eletrolítico é a utilização de equipamentos simples e de fácil operação, remoção eficiente de substâncias que dão gosto, cor, odor e tempos de detenção pequenos (MOLLAH *et al.*, 2001), em relação a outros processos de desinfecção, como por exemplo, o tratamento por raios UV, pois necessitam, para se ter melhor desempenho, que se passe por filtração para se diminuir a turbidez do efluente, aumentando assim custo do processo de tratamento (GONÇALVES *et al.*, 2003).

Durante o processo eletrolítico os principais fenômenos eletroquímicos que ocorrem no tratamento de efluentes são a eletrólise do efluente, eletrocoagulação, eletroflotação e eletrooxidação.

Na eletrólise da água, a água é reduzida ao hidrogênio no catodo e oxidada ao oxigênio no anodo. Esses gases ajudam a flotar os poluentes presentes no meio para a superfície.

A eletrocoagulação envolve a geração de íons metálicos no anodo enquanto que gás hidrogênio é liberado no catodo (CHEN, 2004). A coagulação ocorre quando os cátions do metal se combinam com as partículas negativas carregadas para o anodo pelo movimento eletroforético. Os contaminantes presentes na corrente de água residuária são tratados tanto por reações químicas e precipitação ou ligação física e química aos materiais coloidais que estão sendo gerados pela erosão do eletrodo. Eles são então removidos por eletroflotação, ou sedimentação e filtração (MOLLAH, 2004).

A eletroflotação é um processo simples que flota os poluentes para a superfície por microbolhas de hidrogênio e oxigênio geradas pela eletrólise (CHEN, 2004).

Na eletrooxidação, os poluentes são destruídos tanto por processo de oxidação direto ou indireto.

No processo de oxidação direto, os poluentes são primeiramente adsorvidos na superfície do anodo e então destruídos pela reação de transferência de elétron anódica (RAJKUMAR; PALANIVELU, 2004). Os óxidos, hidróxidos e oxi-hidróxidos sólidos fornecem superfícies ativas para a adsorção da espécie poluente (MOLLAH, 2004). Já o processo de oxidação indireto, oxidantes fortes tais como hipoclorito/cloro, ozônio, peróxido de hidrogênio são gerados eletroquimicamente. Os poluentes são então destruídos em solução pela reação de oxidação do oxidante gerado. Todos os oxidantes são gerados *in situ* e utilizados imediatamente (RAJKUMAR; PALANIVELU, 2004).

Salles (2008, *apud* WIENDL, 1998) relata uma eficiência de desinfecção do esgoto tratado somente por processo eletrolítico (em valores médios de coliformes totais/100 ml) da ordem de 97,9882%. Sinoti e Souza (2004), em pesquisa com sistema eletrolítico, atribui aos mecanismos de eletrocoagulação, eletrofloculação, eletroflotação e geração de produtos oxidantes a eficiência de desinfecção e de características gerais de efluentes sanitários.

Aisse *et al.* (2005) e Fang *et al.* (2006) afirmaram que a geração de trihalometanos com uso do dispositivo eletrolítico é menor se comparada à cloração química, porém uma grande formação de íons clorato foi observado por Fang *et al.* (2006), o que, segundo os autores, sugere que outros agentes fortemente oxidantes são gerados, aumentando a eficiência da inativação de microrganismos e alterando a formação de subprodutos de desinfecção.

2.2.4.2 Parâmetros que influenciam o processo de eletrocoagulação

2.2.4.2.1 Densidade de corrente

A densidade de corrente influencia diretamente no desempenho do processo de eletrocoagulação, pois quanto maior, maior será a geração dos agentes coagulantes e gases, reduzindo o tempo de reação. No entanto, ao aumentar a densidade de corrente o desgaste dos eletrodos e o consumo de energia serão proporcionalmente maiores (MERMA, 2008).

Segundo Wimmer (2007, *apud* CHEN, 2004) para que um sistema de eletrocoagulação opere por um longo período sem manutenção, é sugerida uma densidade de corrente de 20 a 25 A/m² a menos que sejam feitas medidas para limpeza periódica da superfície dos eletrodos.

2.2.4.2.2 Materiais e espaçamento dos eletrodos

O material tem efeito significativo no tratamento do efluente. Por apresentarem baixo custo e estarem facilmente disponíveis o ferro e o alumínio são os mais utilizados. Entretanto, o eletrodo de ferro apresenta a desvantagem de fazer com que o efluente durante e após o tratamento ficar com uma cor residual verde ou amarela bastante forte, sendo que essa coloração é atribuída, respectivamente, aos íons Fe²⁺ e Fe³⁺, gerados no tratamento eletrolítico. Enquanto com o eletrodo de alumínio, o efluente final fica claro e estável, não exibindo coloração residual (KUMAR *et al.*, 2004; FERREIRA, 2006).

Sinoti e Souza (2005) apresentam que tanto os eletrodos de ferro ou alumínio ocorre alta eficiência de remoção de coliformes termotolerantes, porém conforme Wimmer (2007, *apud*

KOBYA *et al.*, 2006), quando sob as mesmas condições, os resultados para Demanda Química de Oxigênio (DQO), turbidez e sólidos suspensos foram melhores para eletrodos de alumínio do que os de ferro.

Em relação ao espaçamento dos eletrodos, a solução por possuir uma resistividade à passagem elétrica, será necessária uma tensão maior quanto maior for a distância entre os eletrodos. Esse parâmetro se torna importante quando se deseja otimizar os custos de operação, pois quando a condutividade do efluente for relativamente alta, o aumento da distância dos eletrodos resultará em um consumo de energia menor (CRESPILHO; REZENDE, 2004).

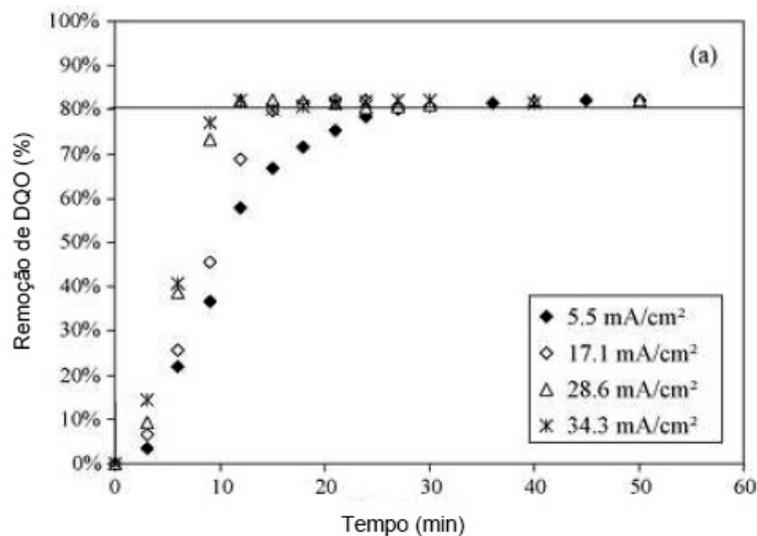
De acordo com Wimmer (2007, *apud* DANESHVAR; SORKHABI; KASIRI, 2004) a eficiência de remoção aumenta com o aumento da distância entre eletrodos; este fenômeno, segundo os autores, provavelmente ocorre porque os efeitos eletrostáticos dependem da distância dos eletrodos, portanto, quando esta aumenta, o movimento dos íons gerados seria mais lento, de modo que teriam mais oportunidades de produzir e agregar flocos que são capazes adsorver mais moléculas.

2.2.4.2.3 Tempo de permanência na célula

Wimmer (2007, *apud* DANESHVAR *et al.*, 2006) relata que o aumento do tempo da eletrólise leva ao aumento da concentração de íons e seus flocos de hidróxidos. Sinoti e Souza (2005) concluíram em sua pesquisa que o tempo se mostrou como fator de eficiência para a remoção de fósforo, coliformes totais, cor, orto-fosfato, alumínio e ferro. Apontaram também que apesar do aumento da eficiência do processo eletrolítico, houve um aumento do consumo de energia, portanto deve-se levar em conta os parâmetros do efluente a ser tratado para evitar gastos de energia.

Essadki *et al.* (2007) estudaram o efeito do tempo de operação na remoção de DQO e turbidez. As curvas para remoção de DQO, apresentada pela Figura 3, mostraram o mesmo valor assintótico, em torno de 83%, independente da densidade elétrica, no entanto o tempo mínimo para o qual a remoção de DQO é maior que 80% diminui com o aumento da corrente elétrica.

Figura 4 - Tempo de eletrólise x remoção de DQO em função da densidade de corrente



Fonte: WIMMER (2007, *apud* ESSADKI *et al.*, 2007)

2.2.4.2.4 Temperatura

A temperatura é também um parâmetro importante visto que esta tem efeito sobre as reações químicas, acelerando-as ou desacelerando-as, causando maior ou menor solubilidade de gases (GOBBI, 2013 *apud* CERQUEIRA, 2006). A eficiência de remoção para o eletrodo de alumínio aumenta inicialmente com a temperatura até 60°C, este fato é atribuído ao aumento da atividade de destruição do filme de óxidos de alumínio na superfície dos eletrodos. Acima desse valor, a eficiência diminui. Porém, a condutividade aumenta com o aumento da temperatura, diminuindo o consumo de energia elétrica (TETERICZ, 2011; BENAZZI, 2013).

Segundo Gobbi (2013, *apud* SANTOS *et al.*, 2006), o aumento da temperatura aumenta a eficiência de redução da DQO. Este aumento de eficiência é atribuído à três possíveis explicações:

1. Reações envolvendo a evolução de produtos gasosos podem ser favorecidas, produzindo um aumento efetivo na eletroflotação;
2. A taxa de oxidação de compostos orgânicos no eletrodo pode ser aumentada, em virtude do caráter cinético da reação;
3. Os agregados da amostra em suspensão podem ser quebrados mais facilmente, aumentando assim a solubilidade do material e da sua oxidação direta no eletrodo. É provável que o aumento de temperatura influencie a cinética das reações envolvidas no processo eletrolítico que conduz a um aumento global da taxa de degradação (GOBBI, L. C. A., 2013, p.48).

2.2.4.2.5 pH do efluente

O efeito do pH do efluente na eletrofloculação está ligado ao desempenho, principalmente da solubilidade de hidróxidos metálicos, responsáveis pela coagulação.

Devido a variação da condutividade, a potência consumida é mais alta no pH neutro, do que em condições ácidas ou alcalinas, e quando a condutividade é alta, o efeito do pH não é significativo (CHEN, 2004).

Uma das vantagens da eletrofloculação é a capacidade de neutralizar o pH do efluente, caso este esteja acima ou abaixo de 7. Para efluentes ácidos, a eletrofloculação tende a subir o valor do pH em decorrência da redução de hidrogênio no cátodo. As outras reações que participam desse equilíbrio são: hidrólise do alumínio ou ferro, formação de oxigênio no ânodo, liberação de CO₂ e formação de outros hidróxidos insolúveis (GOBBI, 2013 *apud* CERQUEIRA, 2006).

Segundo Kobya et al. (2003) as mudanças nos valores de pH dependem do material do eletrodo e do pH inicial. No caso de eletrodo de alumínio, o pH final é mais elevado para valores de pH inicial menores que 8 e acima deste ponto o pH final é mais baixo. Entretanto, para eletrodo de ferro, o pH final é sempre superior ao inicial. A diferença entre pH final e inicial diminui para valores de pH inicial maiores que 8.

Durante a eletrólise da água a formação crescente de oxigênio leva à redução do pH. O hidrogênio gerado no catodo, na forma de bolhas pode se adsorver sobre as espécies coaguladas, induzindo a sua flotação. As bolhas formadas reduzem as incrustações das superfícies do catodo, evitando a formação de depósitos, os quais são responsáveis pela passivação do eletrodo (BENAZZI, 2013).

2.2.4.2.6 Concentração de eletrólitos

Os eletrólitos são frequentemente utilizados para aumentar a condutividade da água ou do efluente a ser tratado, sendo o cloreto de sódio (NaCl) o mais usualmente empregado, pois ele eleva a condutividade do meio, mas não apresenta os efeitos adversos de passivação observados em outros ânions, como carbonatos e sulfatos (BENAZZI, 2013).

A passivação é a formação de uma camada isolante na superfície dos eletrodos, elevando o potencial entre os mesmos, resultando em uma diminuição na eficiência da corrente elétrica. Benazzi (2013, *apud* JIA QIAN, 1988; DONINI *et al.*, 1994) apresenta que para garantir uma

operação normal da eletrofloculação no tratamento em meio aquoso, recomenda-se que entre os ânions presentes, 20% seja de cloretos.

2.2.4.3 Reator eletrolítico

Em relação ao modo de operação, um reator eletrolítico pode ser classificado como: reator de batelada, reator de fluxo contínuo e reator de fluxo contínuo com agitação.

Deve-se considerar alguns fatores importantes na construção de um reator eletrolítico como os custos do eletrodo, da energia elétrica, do trabalho de mão de obra, da manutenção, da desidratação e disposição, onde segundo Kobya *et al.* (2006), os custos de energia e do material do eletrodo representam cerca de 80% do custo total.

Durante a operação de uma célula eletrolítica, a queda de tensão não é distribuída uniformemente, isso se dá pela resistência elétrica do eletrólito e eletrodos. A queda de tensão através da interface da solução e do eletrodo de trabalho determina a constante de velocidade da reação eletroquímica (GRIMSHAW, 2000).

A eletrocoagulação (EC) está diretamente relacionada ao desgaste do eletrodo (corrosão) no processo de geração do agente coagulante, o que significa que a geração de alumínio ou ferro em solução está intimamente relacionada à carga que, por sua vez, pode ser controlada pela corrente elétrica. Assim, a corrente medida por um amperímetro durante um processo de eletrocoagulação é, a princípio, proporcional a quantidade do metal ionizado gerado em solução (SILVA *et al.*, 2005).

Conhecendo-se a massa do eletrodo e a quantidade de íons do metal necessária para promover a coagulação das impurezas, pode-se estabelecer a corrente a ser aplicada para um intervalo de tempo e a área dos eletrodos que participará da eletrólise (SILVA *et al.*, 2005). Deste modo por meio da corrente aplicada pode-se determinar a potência em kWh/m³ de um reator eletrolítico em fluxo contínuo, de acordo com a Equação 1 (FONSECA, 2017).

$$P = \frac{U \times i}{Q \times 1000} \quad (1)$$

Onde:

P = Potência (kWh/m³)

U = Potencial (V)

i = Corrente aplicada na eletrólise (A)

Q = Vazão (m³/h)

2.2.4.4 Vantagens e desvantagens da EC

Mollah *et al.* (2001) e Can *et al.* (2005) apresentam algumas vantagens para a EC, como:

- Equipamento simples e operação e automatização fáceis;
- Tempo de retenção curto;
- Elevadas velocidades de sedimentação;
- Tratamento de água residuária fornece uma água incolor e inodora;
- Produz efluente com menos sólidos totais dissolvidos em comparação aos tratamentos químicos;
- Bolhas de gás produzidas durante a eletrólise podem carregar o poluente ao topo da solução onde pode ser mais facilmente concentrado, coletado e removido;
- Sendo capaz de conseguir uma fonte de eletricidade que seja suficiente para realizar o processo, é possível usar a técnica de EC para o tratamento de água ou água residuária.

Para as desvantagens Mollah *et al.* (2001) e Avsar *et al.* (2007), apresentam:

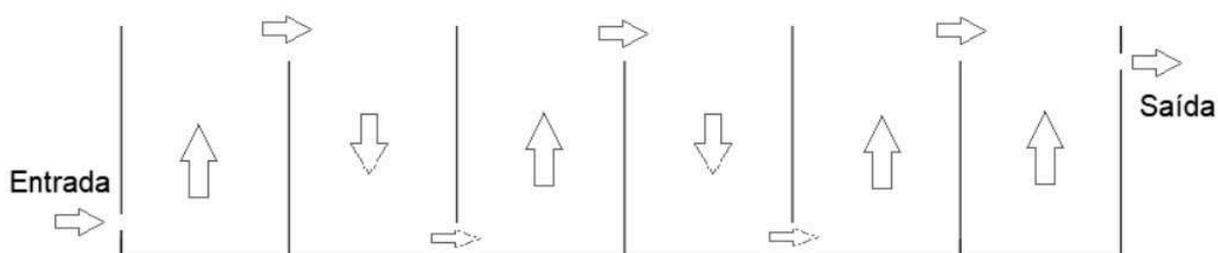
- Como consequência da oxidação os eletrodos de sacrifício são dissolvidos, portanto se torna necessário substituí-los regularmente;
- Uma película de óxido pode ser formada no catodo, o que leva à uma perda de eficiência no processo;
- Requer uma condutividade elevada da água residuária;
- Por ser um processo que utiliza energia elétrica pode se tornar muito caro em alguns locais.

3 METODOLOGIA

Foi realizado um estudo detalhado do processo de desinfecção por processo eletrolítico, quanto ao seu funcionamento, vantagens e desvantagens em relação a outros processos; também foi realizado um estudo das legislações vigentes, principalmente de suas especificações de padrões de lançamento em rios e uso em irrigação convencional.

Para a realização dos testes de desinfecção foi utilizado um protótipo de bancada de uma célula eletrolítica de fluxo contínuo, como mostra a Figura 4.

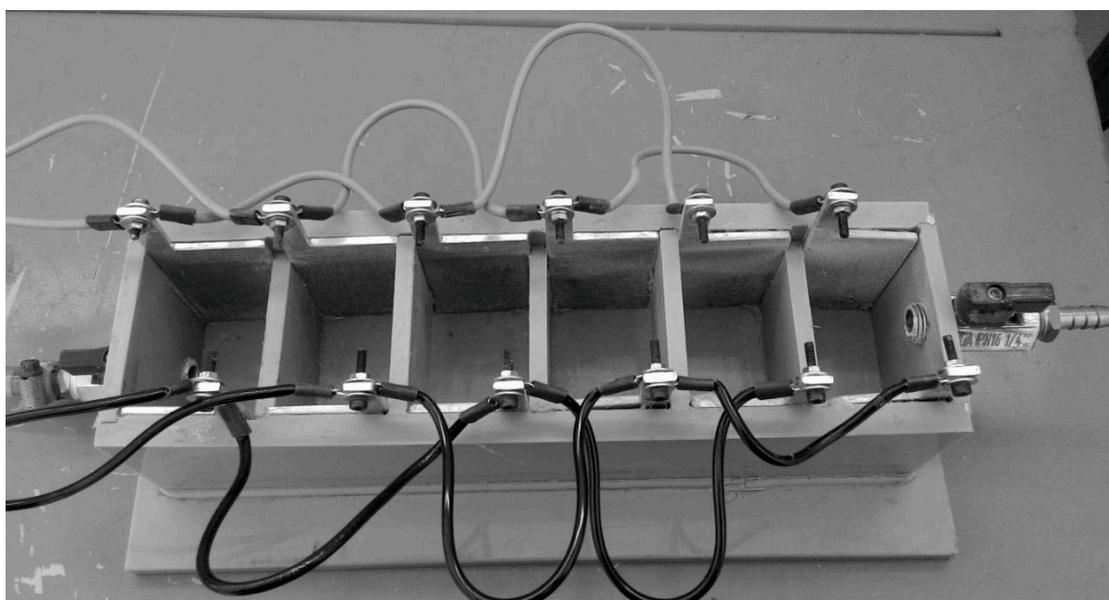
Figura 5 – Representação do fluxo do efluente (vista lateral do protótipo)



Fonte: Autor.

O protótipo foi confeccionado em Polipropileno (PP) com dimensões de 28,6cm x 6,3cm x 6,56cm, com um volume útil de aproximadamente 11 e entrada do efluente por gravidade. Foi utilizado como eletrodos 6 pares de placas de alumínio de dimensões 4,43cm x 6,56cm, dispostos paralelamente, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 6 – Protótipo desenvolvido



Fonte: Autor.

O controle da vazão se fez através de uma válvula agulha, possibilitando um controle preciso da entrada do efluente através da célula eletrolítica. O alumínio foi escolhido como eletrodo, pois este se mostrou como a melhor opção quanto ao custo e quanto aos processos de eletrocoagulação e eletrofloculação para a remoção de coliformes.

O efluente utilizado nos testes, visto pela Figura 6, foi coletado no tanque de decantação, etapa anterior ao sistema de desinfecção com cloro gasoso, da Estação de Tratamento de Esgoto Taubaté-Tremembé, da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP).

Figura 7 – Efluente coletado no tanque de decantação



Fonte: Autor.

Para a coleta de dados foi utilizado um amperímetro para a medição da corrente elétrica, um cronômetro para medições do tempo de detenção. Para os níveis de desinfecção foi escolhido o teste de coliformes fecais, sendo utilizado o sistema de análise microbiológica de coliformes fecais e totais da Alfakit, que constitui de uma microestufa para incubação e colipaper.

Os estudos de custos de operação se deram através de cálculos da potência consumida do protótipo, através da equação 1, e o custo da tarifa de energia elétrica, que foi calculada utilizando a fórmula de cálculo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), representada pela Equação 2.

$$\text{Valor a ser cobrado do consumidor} = \frac{\text{Valor da tarifa publicada pela ANEEL}}{1 - (\text{PIS} + \text{COFINS} + \text{ICMS})} \quad (2)$$

Onde:

PIS = Programa de Integração Social

COFINS = Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social

ICMS = Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços

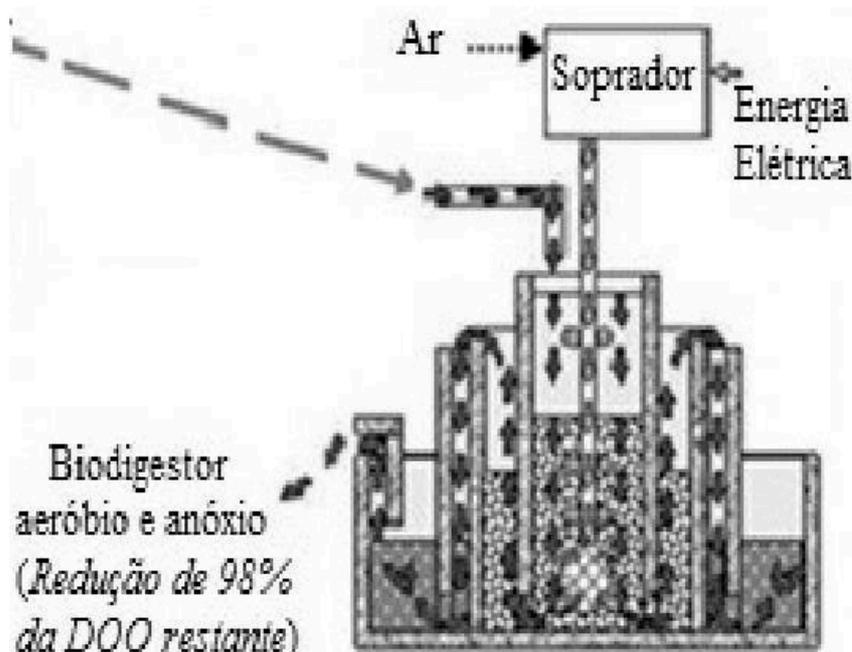
Durante os cálculos do custo de operação das amostras não foi considerado os tributos municipais como a Contribuição para Custeio do Serviço de Iluminação Pública (CIP), sendo considerado apenas os tributos federais e estaduais, como demonstrado pela equação 2.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Godoy Jr. (2003) apresentou que, o efluente tratado em uma miniestação de tratamento de esgoto, embora com apenas 20% de Demanda Química de Oxigênio (DQO), não pode ter o reuso diretamente por questões de coloração, odor e patógenos.

O tratamento conjunto, anaeróbico, aeróbico e anóxico, apresentado na Figura 8, permite a redução de 98% da DQO restante, minimizando os problemas de coloração e odor do efluente, mas não entra na classificação de potabilidade da água para qualquer utilização prevista em legislação (CONAMA, 2011).

Figura 8 – Tratamento anaeróbico, aeróbico e anóxico de efluente



Fonte: Adaptado de GODOY Jr. (2003).

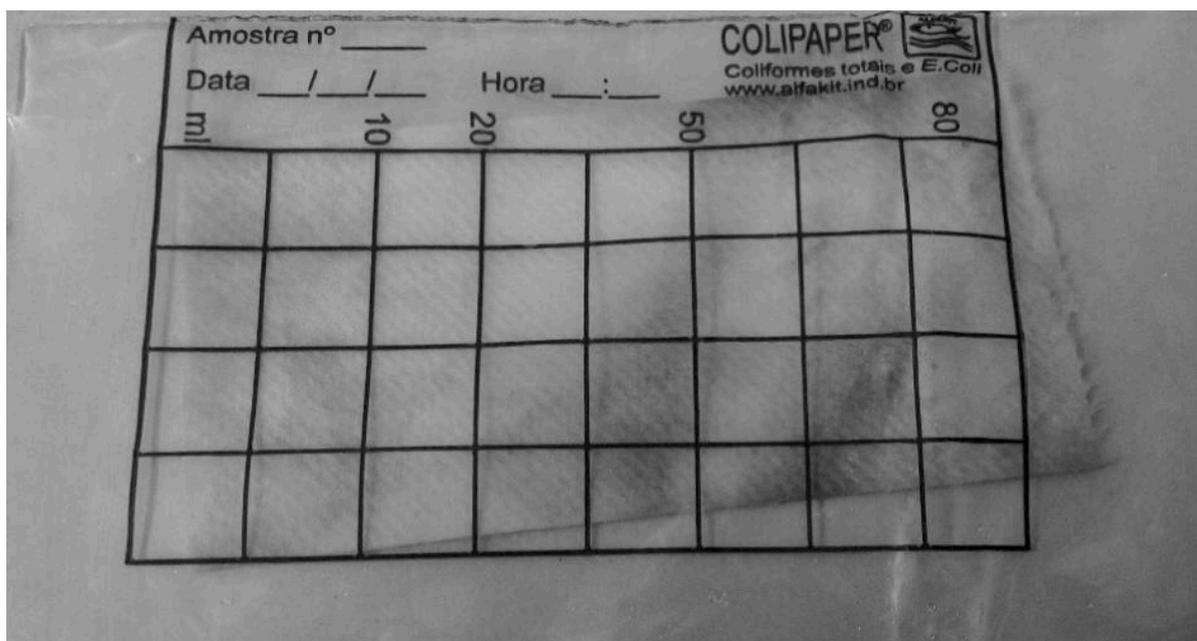
A solução para o caso de miniestações de tratamento de esgoto é a desinfecção do efluente tratado, obtendo uma desinfecção mínima, para a utilização direta em irrigação convencional. Dentre as várias técnicas de desinfecção, esse trabalho tem encontrado bons resultados com o processo eletrolítico.

4.1 TESTES E DADOS

Os testes foram realizados utilizando um retificador de onda completa em ponte e um retificador de meia onda ligados diretamente à rede elétrica, com tensão de 127V, para alimentar

a célula eletrolítica. Foi escolhido como parâmetros de teste: a corrente elétrica, densidade de corrente, o tempo de detenção hídrica (TDH) para obter 1 litro de efluente tratado, potência, vazão e coliformes totais, o qual foi comparado com uma amostra de referência, conforme apresentada na Figura 9, através da lâmina do Colipaper totalmente contaminada após a incubação na microestufa.

Figura 9 – Amostra de referência após incubação



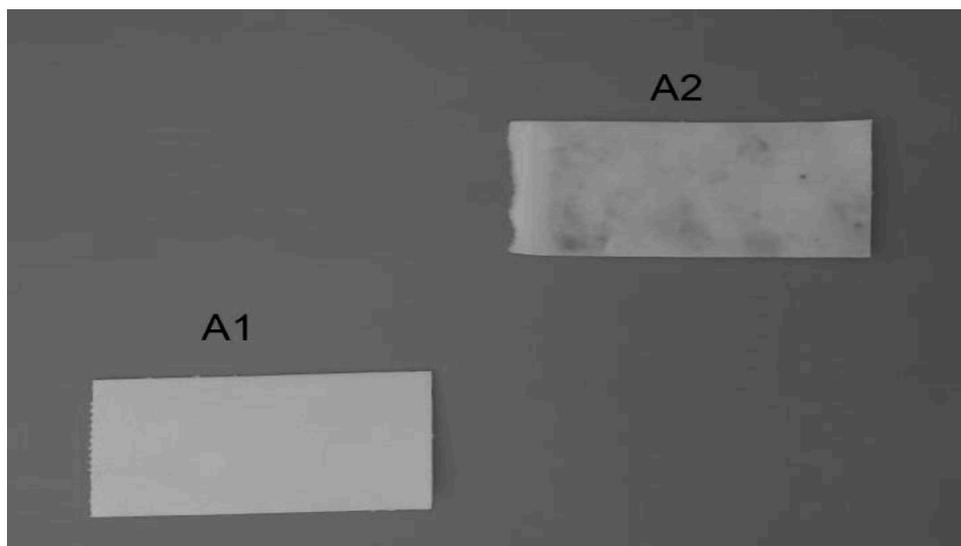
Fonte: Autor.

Foi realizado um teste de vazão com água, controlando a vazão de entrada do efluente com a válvula agulha. Após o teste de vazão, foi escolhido realizar os testes com efluente, com 4 voltas no volante da válvula, pois apresentou um TDH de 3min e 20s para o volume de 1l.

No primeiro teste foi usado o retificador em ponte com tensão média de aproximadamente 120V_{DC}, medido por um multímetro na escala de voltímetro.

Foram coletadas duas amostras A1 e A2, como apresentado na Figura 10, sendo a amostra A2 coletada no 3º slot da célula, em contato com o material flotado e o efluente somente passou por 3 pares de eletrodos.

Figura 10 – Amostras A1 e A2 após incubação



Fonte: Autor.

O segundo teste, após verificar os resultados apresentados nos Colipapers das amostras A1 e A2, foi realizado utilizando o retificador de meia onda, com tensão média de aproximadamente $60V_{DC}$, energizando os 6 pares de eletrodos, amostra A3, e testes com os retificadores de meia onda e onda completa, mas energizando apenas 3 pares de eletrodos, amostras A4 e A5 respectivamente.

O último teste realizado teve uso do retificador de onda completa e 3 pares de eletrodos energizados, porém com 3 voltas no volante da válvula agulha, resultando em uma TDH menor, obtendo a amostra A6.

As amostras A3, A4, A5 e A6, apresentadas pelas Figuras 11 e 12, foram coletadas no registro de saída da célula eletrolítica.

Figura 11 – Amostras A3, A4 após incubação



Fonte: Autor.

Figura 12 - Amostras A5 e A6 após incubação



Fonte: Autor.

A Tabela 2, mostra os valores dos parâmetros: corrente, densidade de corrente e TDH, em relação ao tipo de retificação, tensão média, pares de eletrodos energizados e o número de voltas no volante da válvula agulha.

Tabela 2 – Valores dos Parâmetros

Amostra	Retificação	Válvula (voltas)	Pares Eletrodos	Tensão Média (V)	Corrente (A)	Densidade de Corrente (mA/cm ²)	TDH
Referência	-	-	-	-	-	-	-
A1	Onda Completa	4	6	120	5,8	33,263	5min 46s
A2	Onda Completa	4	3	120	2,9	33,263	2min 53s
A3	Onda Completa	4	3	120	2,23	25,578	2min
A4	Onda Completa	3	3	120	2,014	23,101	55s
A5	Meia Onda	4	6	60	2,68	15,370	7min 42s
A6	Meia Onda	4	3	60	1,119	12,835	2min 9s

Fonte: Autor.

A variação do TDH entre os testes com 4 voltas no volante da válvula, se deu pelo fato da existência de materiais sólidos no efluente coletado, que impediu a passagem contínua do efluente pela válvula agulha, o que acarretou em um tempo maior na amostra A5.

A amostra A4, por ter dado 3 voltas no volante da válvula, apresentou um TDH menor que as outras, mas não foi o suficiente para que ocorresse a desinfecção mínima prevista pela

legislação, o que se pode concluir que para uma vazão maior de efluente é necessária uma corrente elétrica maior ou que se os eletrodos estejam próximos, assim o efluente terá uma área de contato maior com as placas aumentando os efeitos da eletrofloculação.

A Tabela 3, apresenta os resultados de coliformes totais, dados em unidade de formação de colônia por 100ml (UFC/100ml), das amostras em relação a amostra de referência.

Tabela 3 – Coliformes Totais

Amostra	Coliformes Totais (UFC/100ml)
Referência	>>1600
A1	0
A2 (3º slot com espuma)	640
A3	0
A4	1360
A5	0
A6	>>1600

Fonte: Autor.

Através dos resultados da amostra A2, que foi coletada no 3º slot da célula eletrolítica e apresentava espuma formada pelo processo de eletroflotação que não foi retirada por completo, pôde-se concluir que mesmo o processo eletrolítico destruindo a membrana dos patógenos, o material flotado continha bactérias sobreviventes. Portanto, sendo importante para a viabilidade do processo, impedir que esta espuma entre em contato com o efluente tratado, pois causaria a proliferação dos patógenos depois de certo tempo, podendo assim, não alcançar os limites estabelecidos na legislação.

Um fato importante a se notar é que o número de unidade de colônias na amostra A2 estava abaixo de 1000 UFC/100ml, limite máximo permitido para Águas Doce – Classe 2, o que levou a conclusão de que, para o retificador de onda completa com o nível de tensão de 120V_{DC}, não era necessário todos os pares de eletrodos estarem energizados durante o processo, o que foi provado pelo resultado da amostra A3, porém o mesmo não ocorreu com o retificador de meia onda, amostra A6, pois a corrente apresentada estava baixa em relação ao tempo de detenção.

4.1.1 Consumo energético

A Tabela 4, mostra os valores da vazão, em l/min, e potência consumida durante os testes das amostras 1 a 6, onde o cálculo da potência dos testes foi realizado de acordo com a equação 1, porém com as devidas conversões de unidades para que o valor expresso seja dado em kWmin/l.

Tabela 4 – Vazão e Potência Consumida

Amostra	Vazão (l/min)	Potência (kWmin/l)
A1	0,173	4,02
A2	0,346	1,02
A3	0,5	0,535
A4	1,090	0,221
A5	0,129	1,24
A6	0,465	0,144

Fonte: Autor.

Segundo as tarifas de baixa tensão (Grupo B) da concessionária de energia elétrica Elektro, dispostas pela ANEEL, através da Resolução Homologatória ANEEL nº 2592/2019, de 20 de agosto de 2019, o valor do kWh foi de R\$ 0,53187 (Subgrupo B3 – Demais Classes), através da equação 2 o valor final para o consumidor foi de 0,68904 R\$/kWh², porém através do Decreto 7891, de 23 de janeiro de 2013, é concedido um percentual de desconto à Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e Tarifa de Energia (TE).

Este desconto é concedido para Serviço Público de Água, Esgoto e Saneamento, dentre outros grupos e classes de usuários do serviço público de distribuição de energia elétrica. Esse percentual de desconto, para o ano de 2019, foi de 12% para as duas tarifas, desse modo o valor final do kWh foi de 0,60636 R\$/kWh.

Durante o mês de agosto de 2019 a bandeira tarifária vigente foi a vermelha, patamar 1, o que configurou em um aumento do custo em R\$ 4,00 para cada 100 kWh consumidos, ou R\$ 0,04 por kWh consumido (ANEEL, 2019).

Por não ter sido viável durante os experimentos, pela falta de efluente principalmente, para demonstrar os valores dos custos de operação, foi realizado os cálculos na situação

² Os valores para o PIS/PASEP, COFINS (do mês de agosto de 2019) e ICMS foi de, 0,86%, 3,95% e 18% (valor para indústria, serviço público, etc.) respectivamente.

hipotética onde o protótipo trabalharia 24 horas por 30 dias ininterruptos, mantendo os mesmos parâmetros apresentados na tabela 2.

A Tabela 5 expõe os valores de vazão e potência em l/h e kWh/l, respectivamente; já a Tabela 6, através dos valores da potência consumida e tarifa de energia, mostra os valores de energia consumida e custo de operação em kWh/mês e R\$/mês, respectivamente.

Tabela 5 – Vazão e Potência Consumida por hora

Amostra	Vazão (l/h)	Potência (kWh/l)
A1	10,404	0,067
A2	20,809	0,017
A3	30	0,009
A4	65,455	0,004
A5	7,792	0,021
A6	27,069	0,002

Fonte: Autor.

Tabela 6 – Custo de Operação

Amostra	Energia consumida (kWh/mês)	Custo de operação (R\$/mês)
A1	501,889	324,401
A2	254,702	164,629
A3	194,4	125,652
A4	174,009	112,472
A5	117,815	76,151
A6	38,979	25,194

Fonte: Autor.

Através da tabela 6 pode-se notar que a amostra A4 apesar de apresentar um custo de operação próximo ao da amostra A3, não conseguiu, mesmo que muito próximo, o nível máximo permitido de 1000 UFC/100ml. Pode-se atribuir esse fato ao TDH da amostra A4 que não foi o suficiente dado o nível de corrente elétrica e pares de eletrodos.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho estudou a viabilidade técnica e econômica de um processo de desinfecção utilizando processo eletrolítico em fluxo contínuo, para atingir uma desinfecção mínima, que permita a utilização da água residuária em irrigação convencional.

Apesar do empecilho da válvula agulha não ter permitido um controle preciso da vazão, pode-se concluir quanto a desinfecção do efluente, através do protótipo desenvolvido, que os resultados foram extremamente satisfatórios, já que a amostra A2 mostrou valores dentro do limite de 1000 UFC/100ml, as amostras A1, A3 e A5, apresentaram 100% de desinfecção e a proposta do trabalho é a desinfecção mínima segundo a legislação vigente e a amostra A4 mesmo apresentando um valor acima do requerido (1360 UFC/100ml), este valor não ficou muito além do limite máximo estipulado.

Quanto aos estudos econômicos do protótipo a variação de tempo de cada teste se mostrou benéfico no sentido de demonstrar a variação da energia consumida e o custo de operação por mês caso uma célula eletrolítica trabalhasse de acordo com os parâmetros dos testes que apresentaram resultados satisfatórios. Por outro lado, essa variação não permitiu uma visualização mais concreta do real tempo necessário para a desinfecção mínima e por consequência seu custo de tratamento.

Para futuros desafios sugere-se manter uma vazão constante para o estudo do tempo de detenção mínimo, já que esse tempo determina a energia mínima necessária e o estudo de uma célula em maior escala de modo a aproximar o de escala real, e assim, refazer os testes de desinfecção e realizar estudos dos custos de confecção da célula em escala real, da desinfecção e da manutenção, para que se possa realizar comparações com a desinfecção por cloro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Bandeira tarifária para agosto é vermelha patamar 1*. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/bandeira-tarifaria-para-o-mes-de-agosto-e-vermelha-patamar-1/656877>. Acesso em: 04 set. 2019.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Informativo ANEEL de deliberações da Diretoria*. p. 3. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/documents/654778/19224298/Info++Agosto+2019.pdf/dba23e30-e045-cfa3-44dc-5ccb6222725c>>. Acesso em: 04 set. 2019.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. *Por Dentro da Conta de Luz: Informação de utilidade pública*. p.15. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Cartilha_1p_atual.pdf>. Acesso em: 01 set. 2019.

AISSE, M. M.; CORAUCCI FILHO, B.; ANDRADE NETO, C. O.; JÜRGENSEN, D.; LAPOLLI, F. R.; MELO, H. N. S.; PIVELI, R. P.; LUCA, S. J. *Cloração e Descloração*. In: Desinfecção de efluentes sanitários. PROSAB 3. ABES-RJ. RIMA. São Carlos. p.113-168, 2003.

AVSAR, Y., KURT, U e GONULLU, T. *Comparison of classical chemical and electrochemical processes for treating rose processing wastewater*. Journal of Hazardous Materials 148, p.340-345, 2007.

BARBOSA, A. de O. *Uso da Radiação Ultravioleta como Técnica Avançada de Tratamento de Água*. 2016. 52p. Monografia – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB.

BENAZZI, T. L. *Otimização de um Sistema de Eletrofloculação em Fluxo Contínuo para o Tratamento de Efluentes Líquidos das Indústrias de Laticínios*. 2013. 120p. Tese Doutorado – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, RS.

BRASIL. Presidência da República. *Decreto N° 7.891, de 23 de Janeiro de 2013*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2013/Decreto/D7891.htm>.

Acesso em: 06 set. 2019

CAN, O.T. et al. *Treatment of Textile Wastewater by Combined Electrocoagulation*. Chemosphere, v.62, p.181-187, 2005.

CARDOSO, L. S.; DE CARLI, G. A.; LUCA, S. J. *Cryptosporidium e Giardia em efluentes biologicamente tratados e desinfetados*. Engenharia Sanitária e Ambiental. v.8. n.4, Rio de Janeiro. p.285-290, 2003.

CAVICCHIOLI, A.; GUTZ, I. G. R. *O uso de radiação ultravioleta para o pré-tratamento de amostras em análise*. Instituto de Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CERQUEIRA, A. A. *Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis*. 2006. 111p. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, RJ.

CHEIS, D. Desinfecção de água e efluentes com raios efluentes. Revista TAE, 13. ed., jun. 2013.

CHEN, G. *Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment*. Separation and Purification Technology 38, p.11-41, 2004.

CRISPILHO, F. N.; REZENDE, M. O. O. *Eletroflotação: princípios e aplicações*. São Carlos: RIMA Editora, 2004. 96 p.

CONAMA. Ministério do Meio Ambiente. *Resolução n° 357, de 18 de março de 2005*. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>>. Acesso em: 01 jun. 2019.

CONAMA. Ministério do Meio Ambiente. *Resolução n° 430, de 13 de maio de 2011*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res11/propesol_lanceflue30e31mar11.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2019.

DANESHVAR, N.; SORKHABI, H. A. e KASIRI, M.B. *Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections*. Journal of Hazardous Materials B112, p.55-62, 2004.

DANIEL, L. A.; BRANDÃO, C. C. S.; GUIMARÃES, J. R.; LIBÂNIO, M.; LUCA, S. J. *Processos de desinfecção e desinfetantes alternativos na produção de água potável*. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico – PROSAB, edital 2, RIMA, São Carlos, 153p, 2001.

DENARO, A. R. *Fundamentos de eletroquímica*. São Paulo: ed. Edgard Blücher, 161p, 1974.

Dias, V. D. *Radiação Ultravioleta e Ozônio Aplicados como Métodos Alternativos de Desinfecção de Efluentes Secundários de Esgoto Sanitário*. 2001. 150p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos.

DONINI J.C., KAN J., SZYNKARCZUK J., HASSAN T.A., KAR K.L. *Operating cost of electrocoagulation*. Can. J. Chem. Eng., v.72, 1994.

ESSADKI, A. H. *et al. Electrocoagulation/electroflotation in an external –loop airlift reactor – Application to the decolorization of textile dye wastewater: A case study*. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, v.47, p.1211-1223, 2007.

ELEKTRO, *Tarifas de Baixa Tensão do Mês de Agosto de 2019*. Disponível em: <<https://www.elektro.com.br/Media/Default/Tarifas/Tarifas-Baixa-Tensao.pdf>>. Acesso em: 04 de set. de 2019.

FANG, Q.; SHANG, C; CHEN, G. *MS2 inactivation by chloride-assisted electrochemical disinfection*. Journal of Environmental Engineering, v.132, n.1, p.13-22, 2006.

FERREIRA, L. H. *Remoção de sólidos em suspensão de efluente da indústria de papel por eletroflotação*. 2006. 82p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, SP.

FONSECA, A. A. *Tratamento de Esgotos por Processo Biológico Aeróbio Eletroquimicamente Assistido*. 2017. 155p. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, DF.

GEHR, R.; WAGNER, M.; VEERASUBRAMANIAN, P.; PAYMENT, P. *Disinfection efficiency of peracetic acid, UV and ozone after enhanced primary treatment of municipal wastewater*. *Water Research*, 37, p.4573-4586, 2003.

GOBBI, L. C. A. *Tratamento de Água Oleosa por Eletrofloculação*. 2013. 120p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus.

GODOY JR., E.; MARCELINO, M. A.; CAMARGO, J. R.; SILVEIRA, J. L.; CORREA, R. C.; HENRIQUE, L. F. N. *Automated Burner and Biogas Register for Sewage Treatment Mini Stations*. *Defect and Diffusion Forum*, Roma, Itália, p.1097-1102, 2010.

GODOY JR., E. *Sistema compacto de biodigestores anaeróbio-aeróbio-anóxico para tratamento de esgoto*, Patente INPI PI: 0301475-4, Rio de Janeiro, RJ. 2003. 11p.

GONÇALVES, R. F. *Desinfecção de efluentes sanitários*. Programa de Pesquisas em Saneamento Básico – PROSAB. edital 3. ABES-RJ. RIMA. São Carlos. 2003. 438p.

GONÇALVES, R. F.; CORAUCCI FILHO, B.; CHERNICHARO, C. A. L.; LAPOLLI, F. R.; AISSE, M. M.; PIVELI, R. P.; SANT'ANA, T. D. *Desinfecção por radiação ultravioleta*. In: *Desinfecção de efluentes sanitários*, PROSAB 3, ABES-RJ, RIMA, São Carlos, p.209-275, 2003.

GRIMSHAW, J. *Electrochemical Reactions and Mechanisms in Organic Chemistry*. Belfast: Elsevier, 416p, 2000.

HOLT, P. K. *et al.* *The future for electrocoagulation as a localized water treatment technology*. *Chemosphere* 59, p.355-367, 2005.

JIA QIAN J. *An anodic passivation of electrocoagulator in the process of water treatment*. *Water Treat.*, v.3, 1988.

KERWICK, M.; REDDY, S.; HOLT, D.; CHAMBERLAIN, A. *A methodology for the evaluation of disinfection technologies*. Journal Water Health, v.3, n.4, p.393-404, 2005.

KOBYA, M.; CAN, O. T.; BAYRAMOGLU, M., *Treatment of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes*. Journal of Hazardous Materials, B100, p.163-178, 2003.

KOBYA, M., HIZ, H., SENTURK, E., AYDINER, C., DEMIRBAS, E. *Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation*. Desalination, n. 190, p.201- 211, 2006.

KUMAR, P. R. *et al. Removal of arsenic from water by electrocoagulation*. Chemosphere 55, p.1245-1252, 2004.

LAPOLLI, F. R.; DOS SANTOS, L. F.; HASSEMER, M. E. N.; AISSE, M. M.; PIVELI, R. P. *Desinfecção de efluentes sanitários por meio da ozonização*. In: Desinfecção de efluentes sanitários, PROSAB 3, ABES-RJ, RIMA, São Carlos, p.169-208, 2003.

LORENA, C. A. G. *Tratamento De Água Oleosa Por Eletrofloculação*. 2013. 120p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo, ES.

MARCELINO, M. A. *Autossuficiência Energética em Sistema de Desinfecção de Águas Residuárias Sem o Uso de Produtos Químicos*. Projeto de Bolsa de Produtividade em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora, CNPq, 2014.

MERMA, A. G. *Eletrocoagulação Aplicada a Meios Aquosos Contendo Óleo*. 2008. 123p. Dissertação de Mestrado – Universidade Católica do Rio De Janeiro, RJ.

METCALF & EDDY. *Engenharia de tratamento e reuso de águas residuais*. 2004. 4 ed. Nova Iorque: McGraw-Hill,2013. 1820 p.

MOLLAH, M. Y. A. *et al. Electrocoagulation (EC) – science and applications*. Journal of Hazardous Materials B84, p.29-41, 2001.

MOLLAH, M. Y. A. *et al.* *Fundamentals, present and future of electrocoagulation*. Journal of Hazardous Materials B114, p.199-210, 2004.

MONTESANTI, J. de A. C. *Efluentes*. InfoEscola.

Disponível em <<https://www.infoescola.com/ecologia/efluentes/>>. Acesso em 22 abril 2019.

MORAES, R. *Água poderá ser tratada sem cloro*. São Carlos, SP. 2006.

RAJKUMAR, D. e PALANIVELU, K. *Electrochemical treatment of industrial wastewater*. Journal of Hazardous Materials B113, p.123-129, 2004.

SALLES, C. A. *Desinfecção Eletrolítica de Efluente Sanitário em Fluxo Contínuo*. 2008. 130p. Dissertação de Mestrado – Faculdade Federal do Mato Grosso do Sul, MS.

SANCHES, S. M.; DA SILVA, C. H. T. DE P.; VIEIRA, E. M. *Agentes Desinfetantes Alternativos para o Tratamento De Água*. Revista Química Nova na Escola. nº17, p.8-12, 2003

SANTOS, M. R. G.; GOULART, M. O. F.; TONHOLO, J.; ZANTA, C. L. P. S. *The application of electrochemical technology to the remediation of oily wastewater*. Chemosphere, n.64, p.393-399, 2006.

SANTOS, D. R.; PALÁCIO, S. S.; BEZERRA, L. N.; GODOY JR., E.; MARCELINO, M. A. *Desinfecção de Efluente de Miniestação de Tratamento de Esgoto Utilizando um Processo Eletrolítico*. XI Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission, São José dos Campos, v.1, p.1-5, 2015.

SILVA, P. C. F.; MAINIER, F. B. *Tecnologia eletroquímica aplicada ao tratamento de efluentes industriais*. In: Semana de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, 7º Seminário Fluminense de Engenharia. Trabalhos técnico-científicos. Niterói: UFF, 2005.

SINOTI, A. L. L.; DE SOUZA, M. A. A. *Processo Eletrolítico no Tratamento de Esgotos Sanitários: Estudo da sua aplicabilidade e mecanismos associados*. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, II-047, Campo Grande/MS, 2005.

SNIS. Secretária Nacional de Saneamento. *Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2017*. p.27-84, 2019.

U.S.EPA, U.S. Environmental Protection Agency. *Chlorine Disinfection – Wastewater Technology Fact Sheet*. 1999. Washington, D.C.

TETERICZ, A. M. *Tratamento de efluente do herbicida Atrazina pelo processo de eletrofloculação*. 2011, 65p. Projeto de trabalho final de graduação - Faculdade Dinâmica de Cataratas, Foz do Iguaçu.

TICIANELLI, E. A.; GONZALEZ, E. R. *Eletroquímica*. 2ª Edição. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, 220p.

WIENDL, W. G. *Processos Eletrolíticos no Tratamento de Esgotos Sanitários*. Ed. ABES: Rio de Janeiro, 1ª ed., 368p., 1998.

WIMMER, A. C. S. *Aplicação do Processo Eletrolítico no Tratamento de Efluentes de uma Indústria Petroquímica*. 2007. 195p. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, RJ.