



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**APLICAÇÃO DO PROCESSO ELETROLÍTICO NO TRATAMENTO DE ÁGUA E**  
**EFLUENTES**

**MANUELLA SOBREIRA LOPES**

**JOÃO PESSOA - PB**  
**JUNHO - 2017**

**MANUELLA SOBREIRA LOPES**

**APLICAÇÃO DO PROCESSO ELETROLÍTICO NO TRATAMENTO DE ÁGUA E  
EFLUENTES**

**Trabalho de conclusão de curso como  
parte integrante dos requisitos  
necessários para a obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Ambiental pela  
Universidade Federal da Paraíba.**

**Orientador: Profa. Dra. Carmem Lúcia  
Moreira Gadelha**

**JOÃO PESSOA - PB**

**JUNHO - 2017**

L864a Lopes, Manuella Sobreira

Aplicação do processo eletrolítico no tratamento de água e efluentes./ Manuella Sobreira Lopes. – João Pessoa, 2017.

49 f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Carmem Lúcia Moreira Gadelha

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Ambiental) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Saneamento Ambiental 2. Tratamento de Efluentes  
3. Tratamento de água 4. Processo Eletrolítico. I. Título.

BS/CT/UFPB

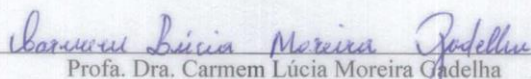
CDU: 2.ed. 624:504 (043)

## FOLHA DE APROVAÇÃO

MANUELLA SOBREIRA LOPES

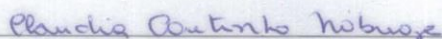
### **APLICAÇÃO DO PROCESSO ELETROLÍTICO NO TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 01/06/2017 perante a seguinte Comissão Julgadora:



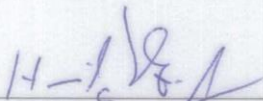
Profa. Dra. Carmem Lúcia Moreira Gadelha  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADA



Profa. Dra. Claudia Coutinho Nóbrega  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADA



Prof. Dr. Hamilcar José Filgueira  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do CT/UFPB

APROVADA

\_\_\_\_\_  
Prof. Adriano Rolim da Paz  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus por nunca ter me abandonado e iluminado cada passo desta caminhada.

Aos meus pais, Manoel Lopes e Marilene Sobreira, que sempre me mostraram qual o caminho certo a seguir e por todo amor, incentivo e apoio.

Aos meus irmãos, Moisés Sobreira e Marcelo Sobreira, por sempre estarem presente em minha vida e apoiarem as minhas decisões.

Ao meu marido, Estevão Camboim, por ter transformado a minha vida e por cuidar da nossa filha para que eu pudesse concluir o curso.

A minha filha linda, Yasmin Sobreira, que mesmo tão pequena me ensinou a ter forças e nunca desistir e por me fazer conhecer o verdadeiro AMOR.

As amigas de apartamento, Goreth Meireles e Samire Dantas, por todo apoio e incentivo, em especial a Yanne Gonçalves por ter me acolhido em sua casa.

A minha prima-irmã, Maressa Ferreira, por estar presente em todos os momentos da minha vida e por me apoiar e aconselhar sempre que precisei.

A minha orientadora, professora Carmem Lúcia, por todos os ensinamentos e ajuda durante o andamento deste trabalho.

Aos professores, Cláudia Coutinho e Hamilcar Filgueira, pela disponibilidade em participar da banca examinadora.

A todos os professores do curso de Engenharia Ambiental por todo conhecimento fornecido ao longo das aulas.

Aos amigos do curso de Engenharia Ambiental, pela amizade e experiências compartilhadas. Em especial a Ana Manuela Rangel, Maria Teresa Rabelo, Natália Guedes e Henrique Oliveira, por estarem comigo desde o começo dessa caminhada compartilhando todas as dificuldades e vitórias ao longo do curso.

Por fim, agradeço a todos que, mesmo nos simples momentos, contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

## **RESUMO**

Em várias regiões do Brasil os serviços de saneamento básico ainda são precários, expondo as pessoas a riscos de contato com água contaminada por causa dos poluentes contidos nos esgotos domésticos e efluentes industriais. O tratamento apropriado para cada tipo de efluente é função da carga poluidora e a presença de contaminantes. O processo eletrolítico se apresenta como uma técnica alternativa e complementar para tratamento de efluentes e que vem sendo pesquisada ao longo das últimas décadas. Desta forma, o estudo objetivou verificar a aplicação do processo eletrolítico no tratamento de água e efluentes. Para alcançar o objetivo principal foi feito um levantamento bibliográfico da aplicação desse processo no tratamento de efluentes e de água. Com as informações encontradas na literatura foi possível construir tabelas apresentando as principais vantagens e desvantagens do processo assim como a eficiência obtida pelos pesquisadores. Verificou-se que o processo se mostrou bastante eficiente na remoção de poluentes e nutrientes. Porém, necessita ainda de estudos mais detalhados para que se conheçam melhor seus mecanismos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Saneamento Ambiental. Tratamento de Efluentes. Tratamento de água. Processo Eletrolítico.

## **ABSTRACT**

In several regions of Brazil, basic sanitation services are still precarious, exposing people to the risk of contact with contaminated water because of the pollutants contained in domestic sewage and industrial effluents. The appropriate treatment for each type of effluent is a function of the pollutant load and the presence of contaminants. The electrolytic process presents itself as an alternative and complementary technique for the treatment of effluents and has been researched over the last decades. In this way, the study aimed to verify the application of the electrolytic process in the treatment of water and effluents. In order to reach the main objective, a bibliographic survey of the application of this process in the treatment of effluents and water was carried out. With the information found in the literature it was possible to construct tables presenting the main advantages and disadvantages of the process as well as the efficiency obtained by the researchers. It was verified that the process was very efficient in the removal of pollutants and nutrients. However, it still needs more detailed studies to better understand its mechanisms.

**KEY WORDS:** Environmental Sanitation. Effluent treatment. Water treatment. Electrolytic Process.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação da população brasileira atendida com serviço de coleta de esgoto.....	15
Figura 2: Tratamentos utilizados para efluentes.....	17
Figura 3: Impurezas contidas na água .....	20
Figura 4: Mecanismos de interação de uma célula eletrolítica. ....	24
Figura 5: Representação esquemática do processo de eletrolíse. ....	26
Figura 6: Modelo dos eletrodos: alumínio, ferro e grafite instalados no reator. ....	31
Figura 7: Modelo dos eletrodos: alumínio (a), ferro (b) e grafite (c). ....	31



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Padrao de aceitação para consumo humano .....	21
Quadro 2: Vantagens e desvantagens do processo eletrolítico.....	37
Quadro 3: Vantagens e desvantagens da eletrocoagulação. ....	39
Quadro 4: Vantagens e desvantagens da eletrofloculação. ....	40
Quadro 5: Eficiência de remoção do tratamento eletrolítico.....	41

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
1.1    Objetivos .....	13
1.1.1    Objetivo geral .....	13
1.1.2    Objetivos Específicos .....	13
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>14</b>
2.1 Efluentes .....	14
2.1.1    Esgoto Doméstico .....	14
2.1.2    Efluente Industrial .....	15
2.1.3    Lixiviado .....	16
2.2    Tratamento de Efluentes .....	17
2.2.1    Processos Físicos .....	18
2.2.2    Processos Químicos .....	18
2.2.3    Processos Biológicos .....	19
2.3    Qualidade Da Água Natural .....	19
2.3.1    A Água e seus usos .....	19
2.3.2    Nível de Impurezas .....	20
2.3.3    Potabilidade .....	21
2.4    Processos de Tratamento de Água .....	21
2.5    O Processo Eletrolítico .....	23
2.5.1    Fenômenos Associados com o Processo Eletrolítico .....	24
2.5.2    Tipo de Eletrodos .....	29
2.5.3    Parâmetros de Controle do processo .....	31
2.5.4    O Processo Eletrolítico no Tratamento de Efluentes .....	33

2.5.5	O Processo Eletrolítico no Tratamento de Água .....	35
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>36</b>
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>37</b>
4.1	Vantagens e Desvantagens.....	37
4.2	Eficiência .....	41
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>44</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O acelerado processo de urbanização sem o devido planejamento tem ocasionado vários problemas para a sociedade: poluição da água, poluição atmosférica, poluição do solo, congestionamentos, ocupação irregular do solo, violência, destinação inadequada dos resíduos sólidos, etc. Conforme o Programa das Nações Unidas para Assentamentos Humanos (UN-Habitat), a previsão é que, em 2030, dois terços da população mundial viverão em centros urbanos o que acentuará ainda mais os problemas já existentes (SAMUEL, 2011).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010) no Brasil 84,36% da população concentra-se em área urbana. Isso reflete em uma demanda, não satisfeita, por serviços básicos de água, esgotos e lixo (FORMENTINI, 2012).

A grande deficiência de saneamento básico em várias regiões brasileiras, em especial de esgotamento sanitário, expõe um grande número de pessoas a riscos diretos e indiretos de contato com água contaminada. O volume de esgotos sanitários lançado no solo ou em corpos d'água, em estado bruto ou insuficientemente tratado, carrega expressiva carga de organismos patogênicos excretados por indivíduos ao meio ambiente (MAIA, 2014).

De acordo com o Relatório do Programa Global para Análise e Avaliação do Abastecimento de Água e do Saneamento (UNICEF/WHO, 2012) estima-se que apenas 63% da população mundial tenha acesso ao saneamento e 89% da população à água potável (FORMENTINI, 2012).

O tratamento apropriado para cada tipo de efluente é função da carga poluidora e da presença de contaminantes. Geralmente são utilizados os métodos físicos, químicos e biológicos no tratamento de efluentes. Os processos físicos somente mudam os contaminantes de fase, os biológicos necessitam de grande área ocupacional e de elevado tempo de tratamento, já os processos químicos envolvem o uso de produtos tóxicos. Além disso, os processos biológicos e químicos geram o lodo residual (TERA AMBIENTAL, 2013).

Com o objetivo de suprimir limitações e inconvenientes oriundos dos processos convencionais de tratamento, pesquisadores têm, ao longo das últimas décadas, desenvolvido métodos e técnicas alternativas e complementares para tratamento de efluentes. Entre estas tecnologias, está o tratamento eletrolítico (MAIA, 2014) que se mostra como uma alternativa viável para solução de problemas de desintoxicação de sistemas aquáticos poluídos, tendo em vista que apresenta vantagens em relação a outros métodos de tratamento de água (SILVA, 2016).

O processo eletrolítico tem sido aplicado desde o final do século XIX, notadamente para o tratamento de esgotos sanitários. No século XX, após a década de 1970, foram iniciadas pesquisas para sua aplicação aos tratamentos de efluentes industriais. Algumas pesquisas foram empreendidas nos anos 1990 utilizando o processo eletrolítico para tratamento de chorume (GIORDANO et al., 2011).

Dentre as características que tornam essa tecnologia atrativa estão o fato do elétron atuar como reagente limpo, eficiente e versátil. É um processo de fácil automação, com boa relação custo-benefício e que elimina a necessidade de transporte, estocagem e manuseio de produtos químicos, além da rapidez do processo e facilidade do seu controle operacional (MARTÍNEZ-HUITLE; FERRO, 2006 apud SILVA, 2016).

A tecnologia eletrolítica é capaz de oxidar ou reduzir íons metálicos, íons cianeto, compostos organoclorados, hidrocarbonetos aromáticos e alifáticos e seus derivados. Neste processo, elétrons são preenchidos diretamente ao material tratado, eliminando a necessidade da adição de substâncias redutoras ou oxidantes potencialmente tóxicas. Sua utilização tem larga importância, pois reduz a toxicidade dos efluentes por meio da transformação de substâncias persistentes em facilmente biodegradáveis. Dessa forma, o tratamento eletrolítico permite o aumento da eficiência do tratamento biológico convencional (MAIA, 2014).

De acordo com Moraes (2008) os processos eletroquímicos podem ser agregados a outros métodos de tratamento de efluentes, salientando que antes de sua utilização há necessidade de avaliar sua viabilidade em função das características do efluente e o foco de desinfecção. Isto ocorre porque ainda não há um tratamento padrão que possa ser aplicado a todos os efluentes, de modo que o processo deve ser ajustado conforme o caso.

Diante do que foi exposto este trabalho verificou a aplicação dos processos eletrolíticos no tratamento de água e efluentes.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Verificar a aplicação do processo eletrolítico utilizado como alternativa aos tratamentos usuais de água e efluentes.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Sintetizar as vantagens e as desvantagens do processo eletrolítico;
- Apresentar a eficiência do processo eletrolítico, considerando-o como tratamento principal ou complementar de água e esgoto.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Efluentes**

Os efluentes são substâncias poluentes que, quando lançadas no meio ambiente sem o tratamento adequado, causam sérios danos aos ecossistemas aquáticos e terrestres. São provenientes dos esgotos sanitários, das indústrias, dos lixões, das redes pluviais poluídas e da agricultura, resultado da atividade humana junto à natureza.

Os efluentes possuem características próprias relativas à sua procedência, podendo conter as mais variadas substâncias de origem química e/ou orgânica, seja biodegradável, poluente, tóxica, etc.

#### **2.1.1 Esgoto doméstico**

A palavra “esgoto” costuma ser usada para definir tanto a tubulação condutora das águas servidas de uma comunidade como, também, o próprio líquido que flui por essas canalizações. Esse termo é usado para caracterizar os efluentes provenientes de diversas modalidades do uso de águas, tais como, doméstico, comercial, hospitalar, industrial, utilidade pública, de áreas agrícolas, de superfícies, de infiltração, pluviais e outras fontes (CHAGAS, 2000).

No Brasil, quase metade dos brasileiros não têm acesso a serviço de coleta de esgoto como mostra a Figura 1.

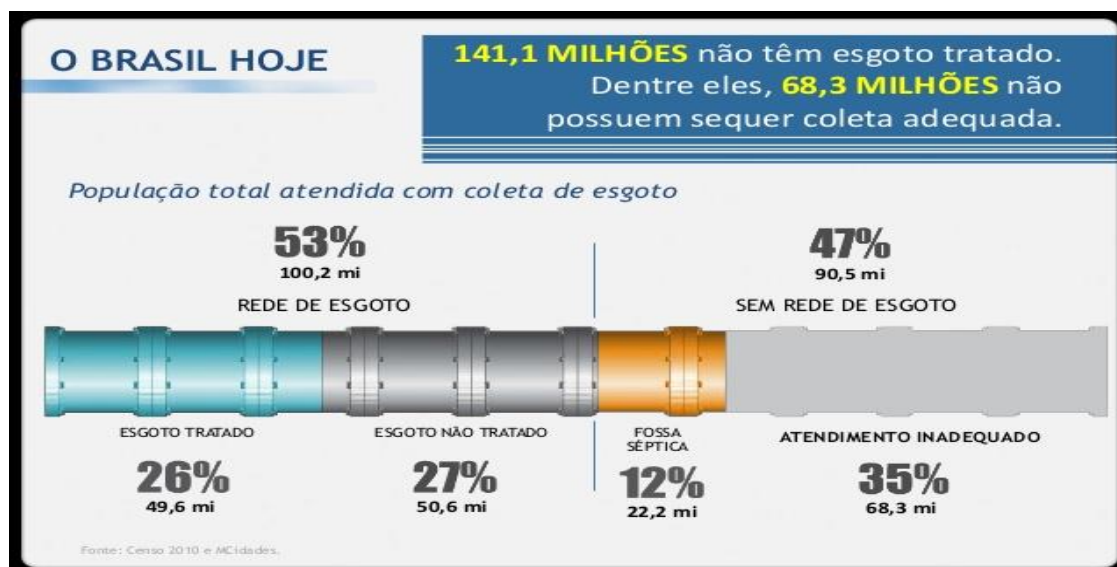
Os efluentes domésticos são provenientes das residências, hotéis, casas de diversões (bares, etc.), clubes, comércios e centros comerciais, de serviços (salões de cabeleireiros, consultórios, clínicas, etc.). São caracterizados por águas residuárias contaminadas, basicamente, por fezes humanas e animais, restos de alimentos, sabões e detergentes (ARCHELA et al., 2003).

É composto por grande quantidade de água, da ordem de 99,9%, contudo é um veículo de patógenos causadores de diversas doenças, como: Salmonella, Shigella, o vírus da hepatite, Entamoebahistolytica, Giardialamblia, Escherichia coli e Cryptosporidium (MORGAN; VESILIND, 2011).

O cenário brasileiro referente ao tratamento de esgoto doméstico, ainda se mostra precário e insuficiente em várias regiões do país. A busca constante por melhorias nesses

processos de tratamento visam evitar a degradação do meio ambiente e a manutenção da saúde pública (MAIA, 2014).

**Figura 1: Representação da população brasileira atendida com serviço de coleta de esgoto.**



Fonte: Silva (2016).

### 2.1.2 Efluente industrial

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua NBR 9800/1987, define efluente líquido industrial como sendo todo despejo proveniente de estabelecimento industrial, englobando águas de refrigeração e pluviais poluídas, efluentes de processo produtivo e esgoto doméstico.

Nas indústrias as águas podem ser utilizadas de diversas formas, tais como: incorporação aos produtos; limpezas de pisos, tubulações e equipamentos; resfriamento; aspersão sobre pilhas de minérios, etc. para evitar o arraste de finos e sobre áreas de tráfego para evitar poeiras; irrigação; lavagens de veículos; oficinas de manutenção; consumo humano e usos sanitários (GIORDANO, 2004).

As características dos efluentes industriais gerados são relacionadas à composição das matérias primas, das águas de abastecimento e do processo produtivo. A concentração dos poluentes nos efluentes é função das perdas no processo ou pelo consumo de água.

O lançamento desses efluentes, tanto nos corpos d'água como, na rede de esgoto a ser tratada, sem o devido tratamento prévio, provoca sérios problemas sanitários e ambientais. Os principais poluentes de origem industrial são os compostos orgânicos e inorgânicos,



especialmente os metais pesados (ARCHELA et al., 2003). Porém, diversos processos industriais geram compostos orgânicos tóxicos, e que são dificilmente biodegradáveis e necessitam de pré-tratamento físico-químico (PULGARIN et al., 1994 apud GIORDANO et al., 2011).

De acordo com Sperling (1995) uma prática que surte bons resultados é a integração dos despejos industriais com os esgotos domésticos, na rede pública coletora, para posterior tratamento conjunto na estação. Para que tal prática seja eficaz, é necessário que sejam previamente removidas dos despejos industriais os contaminantes que possam causar um dos seguintes problemas: toxidez ao tratamento biológico, toxidez ao tratamento do lodo e a sua disposição final e riscos à segurança e problemas na operacionalidade da rede de coleta e interceptação.

### **2.1.3 Lixiviado**

Um sério problema que ocorre nos aterros sanitários é a formação de chorume, que é o líquido produzido pela massa orgânica dos resíduos sólidos durante o processo de degradação biológica. Este líquido em contato com a água da chuva, que percola a massa do aterro, gera o lixiviado (FILHO et al., 2001).

O lixiviado ou percolado de aterros sanitários é originário de quatro diferentes fontes:

- 1.** Da umidade natural do lixo, aumentando no período chuvoso;
- 2.** Do líquido de constituição da matéria orgânica, que se origina durante o processo de decomposição;
- 3.** Das bactérias existentes no lixo, que expelem enzimas e as mesmas dissolvem a matéria orgânica com formação de líquido;
- 4.** De fontes de águas naturais existentes na área de disposição dos resíduos (SÁ et al., 2012).

Estão presentes em sua composição altas concentrações de produtos orgânicos, inorgânicos, metais pesados, substâncias recalcitrantes de difícil degradabilidade e contaminantes microbiológicos, com grande potencial nocivo, tornando-se um efluente altamente tóxico e de difícil tratamento (RODRIGUES, 2007).

Estes efluentes representam um problema de poluição potencial para as águas superficiais e, principalmente, para as águas subterrâneas (SOUZA, 2005). Também, apresenta, em função das suas características, vários problemas e limitações de desempenho para os tratamentos biológicos e esse fato tem despertado interesse de pesquisadores na busca de alternativas tecnológicas viáveis de tratamento físico-químico (GIORDANO et al., 2011).

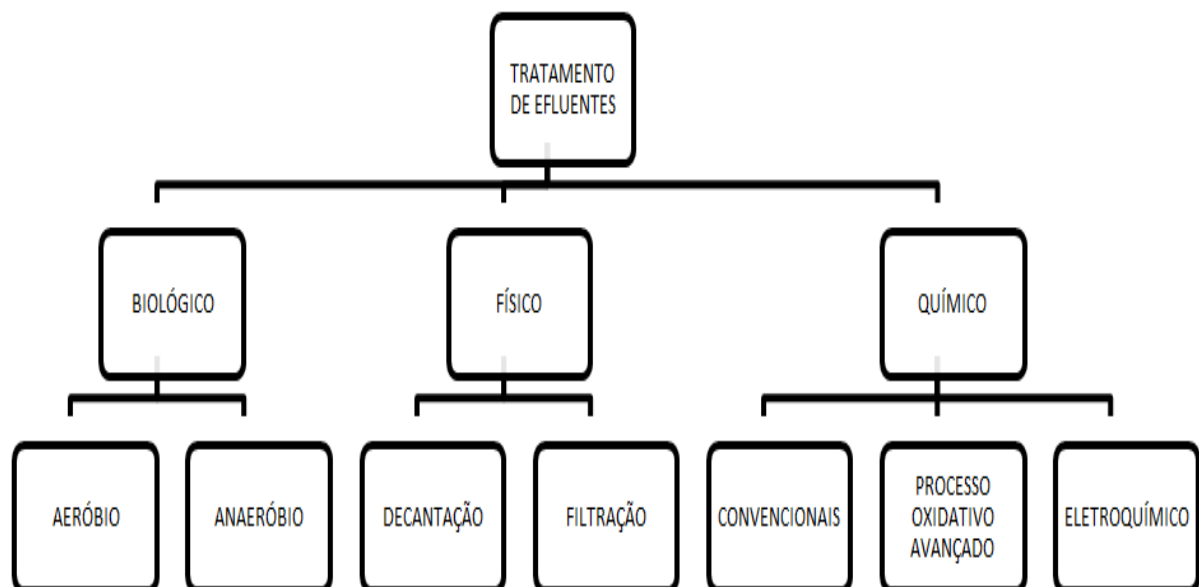
De acordo com Giodarno et al. (2011) pela magnitude do problema e por sua complexidade, o tratamento do chorume é um desafio do saneamento ambiental, considerando-se as viabilidades técnica e econômica. Diversos processos foram desenvolvidos e/ou aplicados, mas o tratamento do chorume ainda não tem uma metodologia desenvolvida. A cada caso são apresentadas soluções sem base teórica que justifiquem a previsibilidade dos resultados dos processos adotados e dos resultados obtidos.

## 2.2 Tratamento de Efluentes

Em virtude da crescente escassez de água no mundo e por ser esse um bem essencial à sobrevivência do ser humano, é fundamental que esse recurso seja reutilizado. A escolha de um tratamento eficaz e que não agrida ao meio ambiente é uma questão de relevante importância (SILVA, 2016).

Os processos de tratamento geralmente estão agrupados em três categorias: físicos, químicos e biológicos. A Figura 2 mostra alguns dos processos utilizados incluindo o tratamento eletroquímico considerado como um tratamento alternativo.

**Figura 2: Tratamentos utilizados para efluentes**



**Fonte:** adaptado de FREIRE et al. (2000).

Algumas questões devem ser levadas em consideração na escolha e aplicação do método de tratamento de efluentes como as características da água residuária, as exigências legais em relação ao lançamento nos corpos hídricos, a área disponível para implantação do sistema e os custos de implantação e operação. Um sistema de tratamento é constituído por uma série de operações e processos que são empregados para a remoção ou transformação de compostos complexos em moléculas mais simples (PHILLIPI et al., 2004).

### **2.2.1 Processos físicos**

São os processos que removem os sólidos em suspensão sedimentáveis e flutuantes por meio de separações físicas, tais como, gradeamento, peneiramento, caixas separadoras de óleos e gorduras, sedimentação e flotação (SILVA, 2016). Também removem a matéria orgânica e inorgânica em suspensão coloidal e reduzem ou eliminam os microrganismos presentes por meio de filtração em leito de areia ou em membranas (microfiltração e ultrafiltração). Os processos físicos também são utilizados com a finalidade de desinfecção, tais como a radiação ultravioleta (TERA AMBIENTAL, 2013).

### **2.2.2 Processos químicos**

Os processos químicos convencionais são aqueles em que a utilização de produtos químicos como agentes de: coagulação, floculação, neutralização de pH, oxidação, redução e desinfecção; são necessárias para aumentar a eficiência da remoção de um elemento ou substância, modificar seu estado/estrutura ou simplesmente alterar suas características químicas (PHILLIPI et al., 2004). Tais processos são, muitas vezes, utilizados em conjuntos com processos físicos e/ou biológicos (TEIXEIRA et al., 2004).

Além dos tratamentos químicos convencionais têm-se os processos oxidativos avançados (POAs) que visam à destruição ou decomposição de contaminantes orgânicos, trabalham basicamente com a geração de radicais hidroxilas, através dos mais variados oxidantes fortes, como por exemplo, o  $O_3$  e  $H_2O_2$  (TEIXEIRA et al., 2004). E o processo eletroquímico onde o reagente utilizado é o elétron.

### **2.2.3 Processos biológicos**

O tratamento biológico tem o objetivo de remover a matéria orgânica dissolvida e em suspensão ao transformá-la em compostos mais simples como água, gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e sais minerais. Basicamente, o tratamento biológico reproduz os fenômenos que ocorrem na natureza, mas em menor tempo (TERA AMBIENTAL, 2013). Os principais processos são:

- Aeróbios: representados por lodos ativados e suas variantes, tais como, aeração prolongada, lodos ativados convencionais, lagoas aeradas facultativas e aeradas aeróbias.
- Facultativos: realizados pela utilização de biofilmes (filtros biológicos, biodiscos e biocontactores) e por algumas lagoas (fotossintéticas e aeradas facultativas). Os biocontactores apresentam também processos biológicos aeróbios.
- Anaeróbios: ocorrem em lagoas anaeróbias e biodigestores.

## **2.3 Qualidade da Água Natural**

A qualidade da água é resultante de fenômenos naturais e da atuação do homem, de maneira geral, pode-se dizer que a qualidade de uma determinada água é função do uso e da ocupação do solo na bacia hidrográfica (VON SPERLING, 2005).

### **2.3.1 A água e seus usos**

Os usos da água são os múltiplos fins a que ela serve. Segundo Von Sperling (2005) os principais usos da água são os seguintes: abastecimento doméstico, abastecimento industrial, irrigação, dessedentação de animais, aquicultura, preservação da flora e da fauna, recreação e lazer, harmonia paisagística, geração de energia elétrica, navegação e diluição de despejos.

Apesar da sua reconhecida importância, os recursos hídricos vêm sendo utilizados de forma predatória pelo homem, ao longo do tempo, pelos lançamentos de diversos tipos de resíduos produzidos nas atividades industriais, domésticas e agrícolas. Problema conhecido genericamente pelo termo “poluição da água”, que é entendido como a adição de substâncias ou de formas de energia que, direta ou indiretamente, alterem a natureza do corpo d’água de uma maneira tal que prejudique os legítimos usos que dela são feitos (SPERLING, 1998).

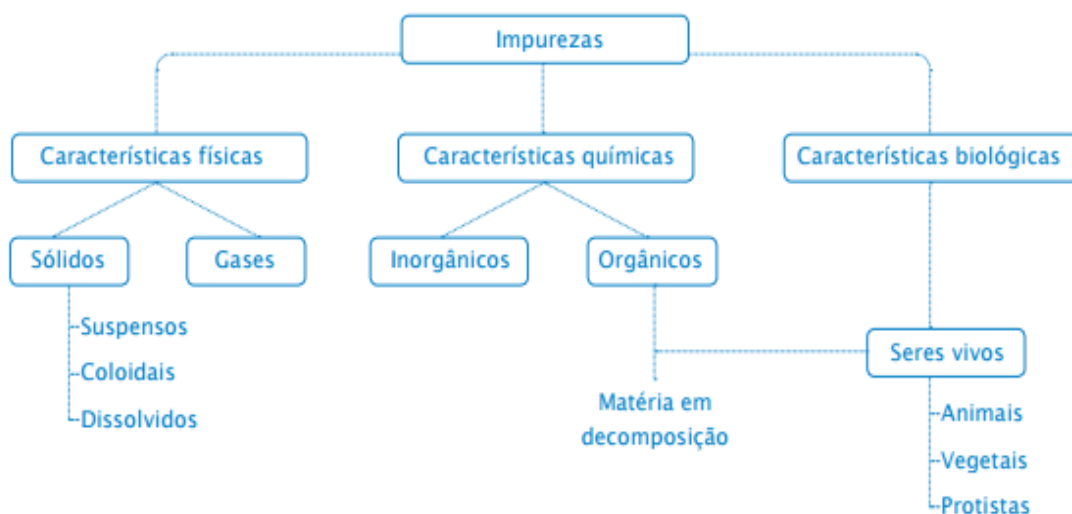
### 2.3.2 Nível de impurezas

De acordo com Bessa (1997), a água possui várias impurezas, classificadas por seu tamanho e comportamento físico-químico. Quando em solução na água, apresentam-se nas seguintes formas:

- Particulado ou suspensão: areia, argila, silte, restos de planta, animais, bactérias e algas.
- Materiais coloidais: argila, sílica ( $\text{SiO}_2$ ), proteínas, compostos orgânicos e vírus (com dimensão entre 3 m $\mu$  e 0,3  $\mu\text{m}$ ).
- Materiais dissolvidos: cátions ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ), ânions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_3^-$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{SO}_4^-$ ), e gases ( $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ , etc.).

A Figura 3 mostra um diagrama das impurezas encontradas na água de acordo com suas características química, físicas e biológicas.

**Figura 3: Impurezas contidas na água**



**Fonte:** Von Sperling (1996).

A remoção destas impurezas se dá por meio da melhor tecnologia de tratamento da água disponível. O tipo, características e quantidade de impurezas minerais, matéria orgânica dissolvida e material biológico e sua concentração, são parâmetros importantes, que direcionam a escolha do processo de tratamento de água mais adequado (LIMA, 2007).

### 2.3.3 Potabilidade

Uma água é dita potável quando é adequada para consumo humano e que não ofereça riscos à saúde.

A água que chega aos consumidores deve atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação. Por isso, os responsáveis pelo serviço de abastecimento de água devem manter um controle da eficiência do processo de tratamento (RECESA, 2007).

Os padrões de potabilidade são um conjunto de valores permitidos como parâmetro da qualidade da água para consumo humano. No Brasil, uma água para ser distribuída deverá estar dentro dos padrões de potabilidade conforme Portaria do Ministério da Saúde nº 2914 de 12 de dezembro de 2011. O Quadro 1 mostra alguns parâmetros e seu valor máximo permitido para o consumo humano.

**Quadro 1: Padrao de aceitação para consumo humano**

PARÂMETRO	UNIDADE	VMP <sup>(1)</sup>
Alumínio	mg/L	0,2
Amônia (como NH <sub>3</sub> )	mg/L	1,5
Cloreto	mg/L	250
Cor Aparente	uH <sup>(2)</sup>	15
Dureza	mg/L	500
Etilbenzeno	mg/L	0,2
Ferro	mg/L	0,3
Manganês	mg/L	0,1
Monoclorobenzeno	mg/L	0,12
Odor	-	Não objetável <sup>(3)</sup>
Gosto	-	Não objetável <sup>(3)</sup>
Sódio	mg/L	200
Sólidos dissolvidos totais	mg/L	1.000
Sulfato	mg/L	250
Sulfeto de Hidrogênio	mg/L	0,05
Surfactantes	mg/L	0,5
Tolueno	mg/L	0,17
Turbidez	UT <sup>(4)</sup>	5
Zinco	mg/L	5
Xileno	mg/L	0,3

NOTAS: (1) Valor máximo permitido.  
(2) Unidade Hazen (mg Pt-Co/L).  
(3) critério de referência  
(4) Unidade de turbidez.

Ativ  
Aces

**Fonte:** Portaria nº 2914/2011- MS

## 2.4 Processos de Tratamento de Água Convencional

Para a água ser consumida sem oferecer risco à saúde, ou seja, para ser potável, é necessário passar por um tratamento de forma a reduzir a concentração de impurezas de

origem química, física e biológica. O objetivo do tratamento é garantir a potabilidade da água distribuída para consumo (MIRANDA et al., 2007). Entre os principais processos de tratamento, tem-se:

- **Aeração:** processo através do qual água e ar são postos em contato de modo a transferir substâncias voláteis e solúveis entre eles até se obter um equilíbrio satisfatório (SOUZA, 2007).
- **Desinfecção:** remoção parcial ou total de bactérias e outros microrganismos. Os principais agentes desinfetantes são: calor, irradiação, luz ultravioleta, ozônio ( $O_3$ ), permanganato de potássio ( $KMnO_4$ ) e compostos de cloro como o hipoclorito de cálcio, hipoclorito de sódio e o cloro gasoso (SOUZA, 2007).
- **Clarificação:** é o processo que visa reduzir a cor e a turbidez da água (SOUZA, 2007). Envolve, fundamentalmente, quatro etapas:
  - *Coagulação:* é a desestabilização das partículas suspensas, ou seja, a remoção das forças que as mantêm separadas (MIRANDA et al., 2007). Essa etapa ocorre no tanque de mistura rápida.
  - *Floculação:* processo que ocorre logo após a coagulação, consistindo no agrupamento das partículas eletricamente desestabilizadas que são os coágulos, de modo a formar outras maiores, denominadas flocos (SOUZA, 2007).
  - *Sedimentação:* o processo consiste na utilização da ação da gravidade para separar partículas de densidade superior a da água, depositando-as em uma superfície ou zona de armazenamento (MIRANDA et al, 2007).
  - *Filtração:* é o processo de remoção das partículas que não foram retiradas na decantação, além dos microrganismos a elas associadas (SOUZA, 2007). Existem dois processos distintos de filtração: filtração lenta e filtração rápida.
- **Fluoretação:** é o processo de complementação do teor de flúor na água, com o objetivo de atingir as concentrações ideais, visando à redução das cáries dentárias (SOUZA, 2007).
- **Correção do pH:** a cal hidratada ou hidróxido de cálcio é um produto químico utilizado no tratamento de água para correção do pH (potencial de hidrogênio).

Durante o tratamento, a água entra em contato com produtos químicos que lhe conferem característica de acidez e isso precisa ser corrigido. Então, o objetivo da adição da cal no tratamento de água é estabilizar o pH para que fique o mais próximo do indicador 7. Muito embora a Portaria do Ministério da Saúde nº 2.914/2011 recomenda o pH na faixa de 6 a 9,5.

## 2.5 O Processo Eletrolítico

O processo eletrolítico baseia-se no conjunto de reações químicas geradas pela passagem de corrente elétrica, entre dois terminais, induzida por uma fonte externa de potência elétrica, propiciando um fluxo de elétrons que podem ocasionar diferentes mecanismos de remoção dos contaminantes (ATKINS, 1990 apud ORSI, 2014).

Na solução em tratamento, denominada solução eletrolítica, com a passagem da corrente elétrica ocorrem reações químicas, dependendo dos íons presentes na solução pode ocorrer a remoção de nutrientes como nitrogênio e potássio (N e P) e até a formação de agentes desinfectantes, como o gás cloro (OTENIO et al., 2008).

Nesse método o reagente utilizado é o elétron, dispensando o uso de materiais químicos que podem ser tóxicos (FREIRE et al., 2000). Como consequência a produção de resíduos é minimizada (CHEN, 2004).

Entre as características que o tornam atrativo destacam-se: versatilidade, eficiência de energia, facilidade de automação, compatibilidade ambiental e baixo custo efetivo.

- **Versátil:** são aplicáveis a uma grande variedade de meios, concentrados ou diluídos, e poluentes, biológicos ou não, encontrados em gases, líquidos e sólidos. Além disso, os tratamentos eletroquímicos podem ser adaptados a diferentes projetos, visando à otimização do espaço físico disponível para as instalações, permitindo o tratamento de pequenas quantidades (microlitros) até grandes volumes (milhões de litros).
- **Boa eficiência energética:** operam em temperaturas inferiores aos seus equivalentes não eletroquímicos, como a incineração térmica. Os eletrodos e as células podem ser projetados para minimizar as perdas de potência decorrentes da queda iônica, da distribuição irregular de corrente e da presença de reações paralelas.
- **Fácil automação:** as variáveis inerentes aos processos eletroquímicos, como a diferença de potencial entre eletrodos, a distância e a corrente aplicada à célula são facilmente operáveis. Além disso, o parâmetro densidade de corrente pode ser



facilmente controlado permitindo a otimização do processo, evitando assim desperdício energético.

- **Custo/benefício:** essa relação é atingida quando a construção de células e reatores eletroquímicos são projetados com materiais eficientes e ao mesmo tempo de baixo custo.
- **Compatibilidade ambiental:** reagentes livres de produtos químicos (MOURA, 2014).

Mohammad e Muttucumaru (2009 apud MAIA, 2014) afirmaram que o processo eletrolítico pode ser aplicado a uma ampla variedade de sistemas de tratamento de água e esgotos, sendo eficazes na remoção de contaminantes inorgânicos e agentes patogênicos.

Utilizando-se o processo eletrolítico é possível remover compostos solúveis e materiais em suspensão, inclusive os colóides (LIN; PENG, 1996 apud GIORDANO et al., 2011).

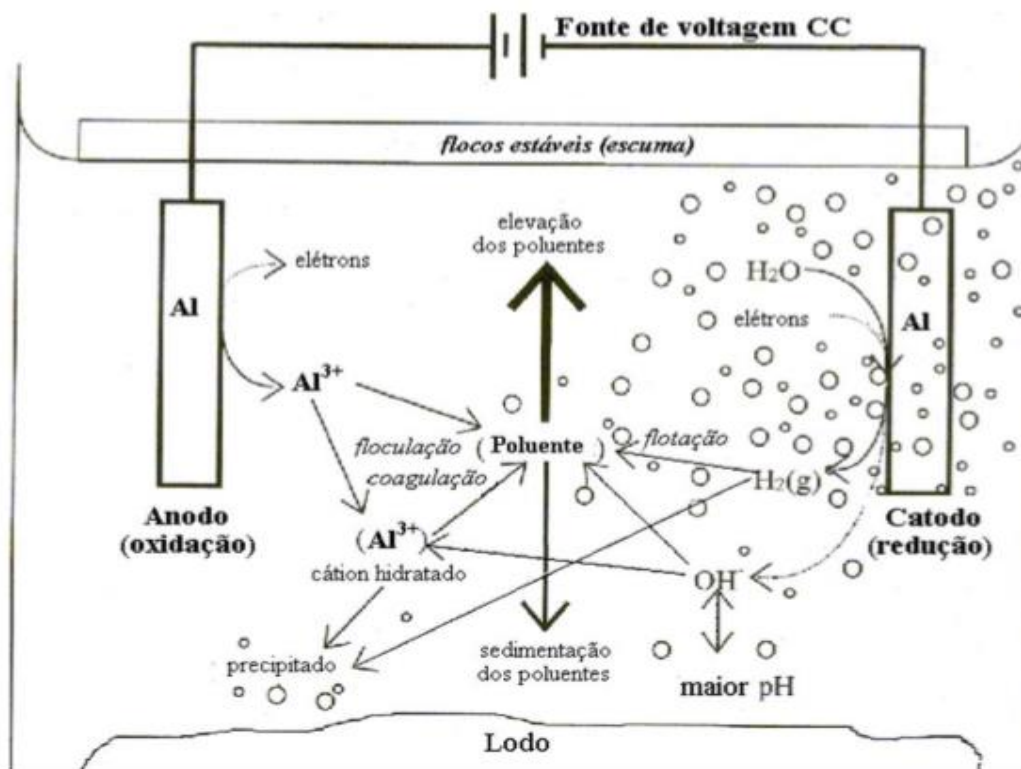
### 2.5.1 Fenômenos associados ao processo eletrolítico

No interior de uma célula eletrolítica ocorrem diversos processos, tais como, floculação, flotação, oxidação, precipitação, eletrólise, clarificação, separação iônica, ozonização, desinfecção dentre outros (MAIA, 2014).

A Figura 4 mostra um processo eletrolítico, onde são utilizados eletrodos reativos de alumínio como ânodo e cátodo, assim como, os diferentes mecanismos de remoção que atuam no efluente a ser tratado, tais como coagulação, floculação e flotação eletrolítica, oxidação, redução e sedimentação.

Dentre as diferentes reações advém à formação de gases, como o hidrogênio e o oxigênio, propiciando a ocorrência da eletrocoagulação e eletrofloculação. Estes mecanismos precipitam o material de maior densidade, sedimentando os poluentes no fundo da câmara ocasionando a formação do lodo. Na eletroflotação, por meio da união dos gases as partículas suspensas, os contaminantes de menor densidade são removidos por meio de arraste para a superfície, gerando a formação da espuma (ATKINS, 1990 apud ORSI, 2014).

**Figura 4: Mecanismos de interação de uma célula eletrolítica.**



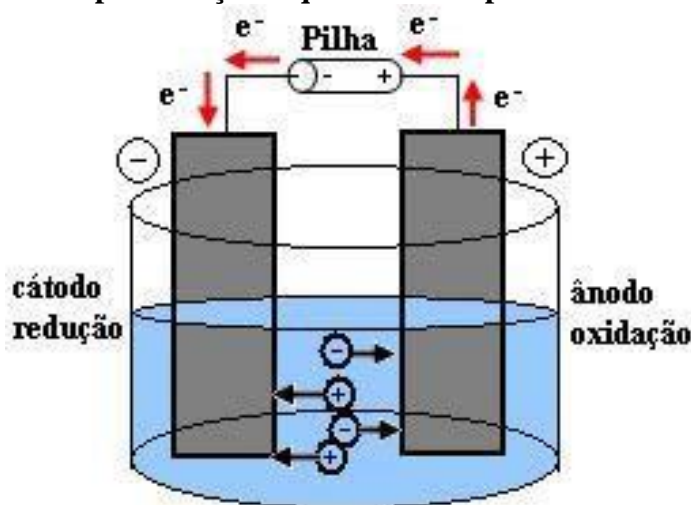
**Fonte:** Sinoti (2004).

### ➤ Eletrólise

A eletrólise ocorre quando dois eletrodos (cátodo/ânodo) ligados aos polos de uma "Fonte" (célula voltáica) de corrente contínua são mergulhados em uma solução aquosa (eletrólito) com condutividade tal que possibilite a condução de corrente através da mesma. A "Fonte" é quem fornece energia para que ocorra a reação eletrolítica, daí porque é chamada de "Fonte de Alimentação". Os eletrodos devem ser feitos de material condutores de eletricidade, como por exemplo: ferro, alumínio, titânio, entre outros (GIACON, 1993).

A "eletrólise" consiste em se fazer com que, quando acionada a fonte de alimentação, os elétrons deixem o ânodo e se dirijam ao cátodo, desta forma ocorrendo reações de oxidação no ânodo e de redução no cátodo. Tais reações geram bolhas nos eletrodos, que se desprendem dos mesmos, indo para a superfície (GIACON, 1993). Na Figura 5 pode-se observar um esquema simples de eletrólise.

**Figura 5: Representação esquemática do processo de eletrolise.**



**Fonte:** Brasil Escola. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/funcao-eletrolise.htm>>.

Através de duas leis estabelecidas por Faraday, o consumo de eletricidade é associado à quantidade total de substâncias reagidas, o que inclui o desgaste do eletrodo (corrosão) no processo da eletrólise (RUSSEL, 1994). As leis de Faraday são assim enunciadas:

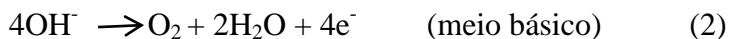
**1ª Lei:** A quantidade de substância que reage, devido ao desgaste do eletrodo ou à deposição no mesmo, ao passar uma corrente contínua, é proporcional à intensidade da corrente e a duração da eletrólise.

**2ª Lei:** Se a corrente elétrica que passa através do eletrodo for contínua, a massa da substância que reage será proporcional ao equivalente químico da substância, que relaciona sua massa com a capacidade de transferência de elétrons num determinado processo.

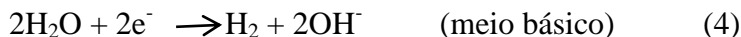
Após a finalização do processo eletrolítico, além do efluente em condições melhoradas, são gerados o lodo e a espuma, em função da degradação parcial ou total das substâncias que se encontravam no efluente e que foram eliminadas. Os eletrodos não reagentes conseguem degradar as substâncias em vários níveis podendo ocorrer, dependendo do estágio que alcance o processo, a inexistência de formação de resíduo (FENG; LI, 2003 apud ORSI, 2014).

Em linhas gerais, segundo Lingane (1970 apud GIACON, 1993), pode-se dizer que as principais reações que ocorrem a nível de superfície do eletrodo, no processo eletrolítico, são as que se referem a decomposição da água, como mostram as reações (1), (2), (3), (4) e (5): No ânodo ocorre a evolução de oxigênio:





No cátodo ocorre a evolução de hidrogênio:



Deste modo a reação global de decomposição da água será:



O oxigênio gerado em uma parte do eletrodo é muito reativo e eficaz, favorecendo pela sua qualidade de oxidante a quebra de eventuais moléculas orgânicas resistentes. Em alguns casos pode-se obter o próprio fenômeno de oxidação, enquanto o hidrogênio produzido no pólo do eletrodo oposto (positivo) é utilizado como redutor sobre moléculas orgânicas (SILVA et al., 2006).

### ➤ **Oxidação e redução**

Para Otenio et al. (2010), a tecnologia eletrolítica está apta a realizar procedimentos por meio da oxidação dos eletrodos, gerada por meio do contato com o oxigênio, ou quando perde hidrogênio ou elétrons para o meio possibilitando oxidar ou reduzir íons metálicos. A redução é o processo inverso da oxidação, quando uma substância perde oxigênio, ou quando passa a ganhar hidrogênio ou elétrons do meio. Nesse processo é possível eliminar a adição de substâncias redutoras ou oxidantes potencialmente tóxicas, diminuindo o efeito nocivo dos efluentes.

### ➤ **Eletrocoagulação**

Holt et al. (2005 apud MAIA, 2014 ) explicaram que a eletrocoagulação é um método eletroquímico de tratamento de água residuária que consiste na liberação de agente coagulante pelo ânodo em solução. A liberação de gás ocorre com o desenvolvimento das reações eletrolíticas (geralmente na forma de bolhas de hidrogênio) no cátodo.

Di Bernardo (1993) afirmou que para a ocorrência do fenômeno da coagulação em um meio líquido é necessário alterar a força iônica da solução, que geralmente ocorre por meio da adição de coagulantes. Nela são adicionados íons de alumínio ou de ferro pela dissolução dos eletrodos reativos, propiciando a desestabilização e agregação de partículas. Ao adicionar os íons de alumínio ou de ferro são acrescidos ao meio espécies hidrolisadas de carga positiva, propiciando choques entre as partículas, levando a formação dos flocos.

Os íons metálicos na solução atuam de forma similar aos tratamentos que usam coagulantes convencionais, a problemática fica em torno do desgaste do eletrodo, que devido a constante troca de íons com o meio sofre desgaste necessitando periodicamente de troca (DI BERNARDO, 1993).

A eletrocoagulação possui uma longa história como tecnologia de tratamento de água empregada para remover uma grande variedade de poluentes. No entanto, ela ainda não foi aceita como uma tecnologia dominante desse tratamento. A falta de uma abordagem sistemática para projeto/operação de reator de eletrocoagulação e a questão do eletrodos (particularmente passivação dos eletrodos ao longo do tempo) limitaram a sua aplicação (HOLT et al., 2005).

#### ➤ **Eletrofloculação**

No tratamento eletrolítico, a eletrofloculação ocorre simultaneamente com a eletrocoagulação, não havendo necessidade da utilização de mecanismos extras para a promoção destes encontros, visto que os mesmos são realizados por meio da turbulência produzida pelas bolhas de gás formadas pela eletrólise. Os flocos formados nesse processo precisam possuir tamanho e densidade suficientes para que sejam retirados por sedimentação ou flotação (RODRIGUES et al., 2001).

Vários autores consideram que a eletrocoagulação/floculação tem se mostrado uma alternativa promissora para o atendimento à legislação ambiental, além de ser versátil e competitiva para instalações em tanques que requerem grandes volumes de água a ser tratada. As unidades de eletrocoagulação/floculação são pequenas e compactas, além de requererem pouca manutenção e baixos custos operacionais menores quando comparados a outras unidades de flotação (MOLLAH, 2001; CRESPILO et al., 2004; CERQUEIRA, 2011; CERQUEIRA; MARQUES, 2012).

#### ➤ **Eletroflotação**

A flotação é um processo utilizado para a remoção de partículas sólidas em suspensão num líquido através da gravidade. O fenômeno ocorre quando estas partículas são aderidas a bolhas de ar inseridas na solução. Como a densidade destes agregados, formados por partícula e bolha, é menor que a da água, estes sobem à superfície levando consigo toda a matéria orgânica em suspensão, acumulando-se em forma de uma espuma flutuante. Na eletroflotação,

as bolhas de gás são produzidas pela eletrólise decorrente do tratamento eletrolítico (RODRIGUES et al., 2001). As bolhas geradas são de oxigênio e de hidrogênio.

De acordo com Di Bernardo (1993), devido aos eletrodos estarem dispostos em toda a extensão da célula eletrolítica ocorre uma dispersão maior de gases por toda a solução, propiciando uma maior eficiência na remoção de resíduos do meio, sem a necessidade de agregar equipamentos ou sistemas complementares.

No processo eletrolítico a adição de íons pode ocorrer pelo desgaste do eletrodo reativo. Para que este desgaste ocorra é necessário avaliar os componentes químicos existentes na solução eletrolítica, considerando a passagem e a quantidade de corrente elétrica consumida, pois este é um dos principais responsáveis pelo custo do processo (HOLT et al., 2002 apud ORSI, 2014).

A distância entre as placas também deve ser considerada. Ao aumentar essa distância poderá ocorrer, dependendo das características da solução eletrolítica, uma maior dificuldade a passagem da corrente pelo meio, sendo proporcional à resistência elétrica que a solução oferecer (JÜTTNER et al., 2000 apud ORSI, 2014).

A eletrólise gera um lodo mineralizado devido as reações eletroquímicas capazes de modificar quimicamente as substâncias que compõem os poluentes. As reações estabilizam o resíduo propiciando menor acúmulo de líquido, os flocos tendem a ser maiores, mais estáveis, possibilitando sua disposição diretamente em leitos de secagem sem a fase de digestão ou sua remoção por filtração (WIENDL, 1998).

### **2.5.2 Tipo de eletrodos**

Existem dois tipos de eletrodos que podem participar dos processos eletroquímicos, os inertes e os reativos (SINOTI et al., 2005).

Os eletrodos devem apresentar grande resistência ao calor, aos eletrólitos presentes e à passagem da corrente elétrica. Quando um eletrodo não sofre alterações na sua estrutura, mesmo sujeito a tais condições, é chamado eletrodo inerte e sua função é a simples troca de elétrons com a solução. Os eletrodos inertes mais comuns são o grafite e a platina. Já o eletrodo reativo, além de transferir elétrons, participa do processo eletroquímico, sendo também modificado pela ação da corrente elétrica, formando ou recebendo íons metálicos (RODRIGUES et al., 2001).

Alguns materiais dos eletrodos inertes possuem a capacidade de decompor moléculas orgânicas em subprodutos. Os subprodutos podem acarretar toxicidade ao efluente, pois, a decomposição, às vezes, leva a formação de ácido carbônico, amônia, dentre outras. Porém, no mesmo meio podem ocorrer reações que produzem substâncias menos prejudiciais, por exemplo a oxidação de fenóis em ácidos maléicos e até sulfetos em sulfatos. (COMNINELLIS, 1994 apud ORSI, 2014).

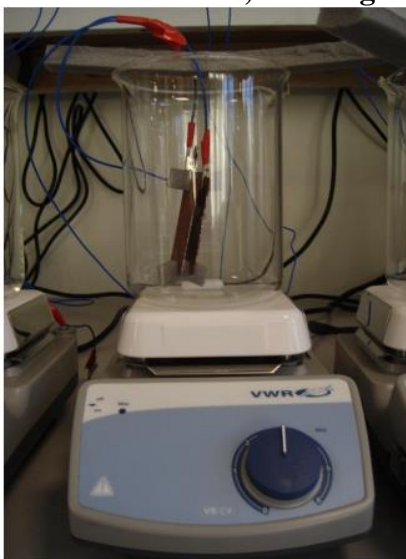
Os primeiros estudos sobre a decomposição de soluções sob a aplicação de uma corrente elétrica utilizaram eletrodos reativos, dentre eles o ferro e o alumínio. Os resultados caracterizaram boa eficiência sobre os contaminantes (orgânicos e inorgânicos) propiciando a formação de gases como o hidrogênio, o oxigênio, e a formação de cloro dentro da célula eletrolítica (WIENDL, 1998).

O eletrodo de ferro é muito utilizado devido a facilidade de aquisição, seu baixo custo, e em todos os estudos onde foi aplicado, ter demonstrado eficiência na produção de oxidantes no meio (RODRIGUES, 2007). Também, os eletrodos reativos de alumínio sofrem dissolução durante o processo, atuando como coagulante e tem demonstrado eficiência sobre as partículas em suspensão, propiciando a separação de material através da flotação e floculação (ORSI, 2014).

A concentração dos eletrólitos, sua composição química, e o número de oxidação de seus íons são responsáveis pela sua condutividade específica, que é diretamente proporcional à facilidade da passagem da corrente ou condutância da solução eletrolítica. Estes conceitos possibilitam avaliar o desgaste dos eletrodos em função do consumo de energia elétrica, e quantificar as massas das substâncias produzidas e consumidas no sistema durante o tempo de ocorrência da eletrólise (KOSOW, 2005).

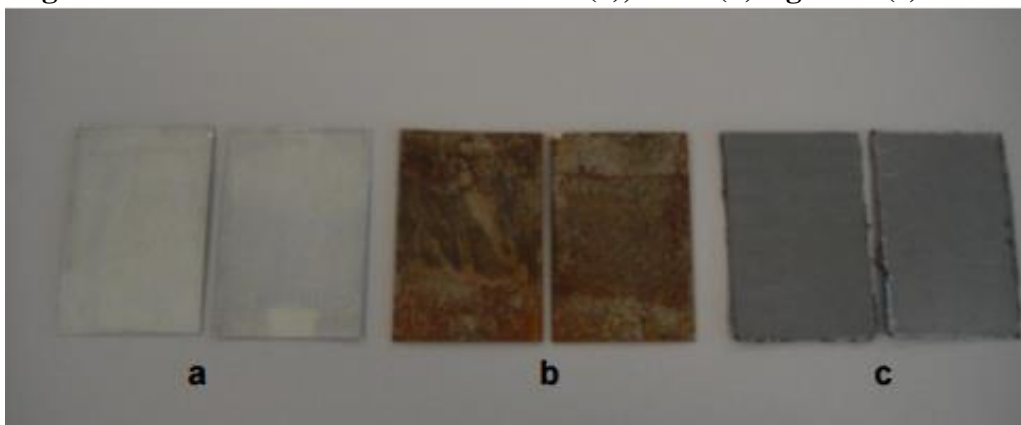
As Figuras 6 e 7 mostram modelos de eletrodos de alumínio, ferro e grafite.

**Figura 6: Modelo dos eletrodos: alumínio, ferro e grafite instalados no reator.**



**Fonte:** Formentini (2012).

**Figura 7: Modelo dos eletrodos: alumínio (a), ferro (b) e grafite (c).**



**Fonte:** Formentini (2012).

### **2.5.3 Parâmetros de controle do processo**

Os sistemas de tratamento de água e efluentes são controlados objetivando a eficiência de remoção dos poluentes e os custos operacionais.

São realizados testes iniciais em escala de laboratório, nos quais o processo é testado e avaliado quanto à aplicação ao tratamento de efluentes específicos. Nestes testes são considerados parâmetros tais como: materiais dos eletrodos, distância entre os eletrodos, diferença de potencial aplicada, corrente específica, pH do meio, condutividade específica, temperatura e tempo de residência (ALEGRE, 1993).



➤ **Potência elétrica**

A potência elétrica está diretamente relacionada com os custos operacionais (GIORDANO et al., 2000). A potência é obtida pela fórmula (1):

$$P = V * I \quad (1)$$

Onde: P = potência (W)

V = diferença de potencial (V)

I = corrente elétrica (A)

A passagem da corrente elétrica é a principal causa do processo de eletrocoagulação, sendo responsável também pelo seu custo, pois além de estar relacionada com a potência consumida está diretamente relacionada com o desgaste dos eletrodos, de acordo com a lei de Faraday.

➤ **Tempo de residência**

O tempo de retenção do efluente na célula também é fator de relevância e pode influir na diminuição da eficiência do processo. Também, o constante contato da solução com os eletrodos pode ocasionar depósito de matéria orgânica sobre o anodo, ou formação de camada de óxidos sobre o cátodo (QUEIROZ et.al., 1994).

➤ **Distância entre as placas dos eletrodos**

A eficiência do processo está relacionada também com a distância entre as placas, pois ela é proporcional à resistência elétrica da solução, oferecida à passagem da corrente (GIORDANO et al., 2000).

Quando a distância entre eletrodos aumenta, a eficiência de remoção aumenta. Esta mudança, provavelmente, ocorre porque os efeitos eletrostáticos dependem da distância entre eletrodos, então, quando esta aumenta, o movimento dos íons produzidos seria mais lento e teriam maior oportunidade de produzir e agregar flocos. Além disso, estes flocos são capazes de adsorver mais moléculas (DANESHVAR et al., 2004).

➤ **Potencial hidrogeniônico (pH)**

É recomendável que o pH esteja na faixa de 6,5 a 7,0, valores onde são obtidas as maiores velocidades de reação. Essa velocidade diminui quando o pH é inferior a 6,5 e ocorre

um aumento da corrosão , não sendo recomendável do ponto de vista econômico (WIENDL, 1998).

Caso o pH esteja na faixa alcalina, também ocorrerá uma redução da velocidade das reações, devido a formação de hidroxilas pelos catodos (WIENDL, 1998). A redução de velocidade pode ser explicada pelo princípio de Le Chatelier, que estabelece que as reações em equilíbrio compensam os distúrbios causados, deslocando o equilíbrio no sentido contrário (RUSSEL, 1994, p. 689). Sempre ocorrerá um aumento do pH.

#### ➤ **Temperatura**

A temperatura tem influência direta na eficiência do processo eletrolítico. Ela aumenta com o aumento da temperatura (WIENDL, 1998), principalmente porque as microbolhas do gás hidrogênio geradas ascendem mais rapidamente para a camada de espuma (flocos eletroflotados acumulados na superfície da camada eletrolítica). Este efeito reduz a passivação dos eletrodos e gera um consequente aumento da eficiência do processo (MANNARINO, 1997).

#### ➤ **Condutividade**

Se a condutividade da solução é pequena, a resistividade que é o seu inverso propicia um aumento da diferença de potencial entre os eletrodos, aumentando a perda de energia de forma inútil, ou seja, pela dissipação de calor denominada de efeito Joule (QUEIROZ et.al., 1994).

#### ➤ **Corrente específica**

Quando a corrente específica aplicada nos eletrodos é muito alta, ou seja, maior que 27 A/m<sup>2</sup>, ocorre a formação de bolhas de hidrogênio em excesso, ocorrendo a passivação do cátodo (ALEGRE; DELGADILLO, 1993a). Isto pode ser evitado pelo controle da corrente, pela agitação da mistura a ser eletrocoagulada, ou pela inversão dos pólos dos eletrodos, limpando o cátodo (SOBRINHO; ZIMBARDI, 1987).

### **2.5.4 O Processo eletrolítico no tratamento de efluentes**

Durante muito tempo o processo eletroquímico ficou à margem dos tratamentos utilizados para melhoria de efluentes. Ele tem sido reavaliado para aplicação no tratamento de

efluentes líquidos e apresentando algumas vantagens como a facilidade de operação e possibilidade de automação. Trata-se de uma opção promissora em relação aos métodos tradicionais, pois, permite a produção de compostos desinfetantes *in situ*, evitando assim agregar custos aos processos, além dos problemas de estocagem e transporte de produtos químicos perigosos. (OTENIO et al., 2010).

Seu uso tem evoluído conjuntamente às novidades tecnológicas, tais como, equipamentos com mais recursos e mais potentes, novos materiais como eletrodos, assim como usos para tratar os mais variados tipos de efluentes, decorrentes da evolução dos processos industriais atuais e das necessidades ambientais (SINOTI, 2004).

De acordo com a classificação de Saturnino de Brito (1943, apud WIENDL, 1998) os processos eletrolíticos aplicados em águas residuais são diretos ou imediatos que atuam sobre a massa líquida a tratar, produzindo a partir dela mesma os elementos ativos para a sua depuração.

As primeiras tentativas de utilização da eletrólise na depuração de esgotos sanitários urbanos remontam ao fim do século XIX (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). Sua primeira aplicação prática no tratamento de esgotos domésticos foi relatada com resultados satisfatórios em Londres, Inglaterra, em 1889, por Webster. Foram utilizados eletrodos de ferro, com adição de água do mar ao esgoto como fonte de sal, aplicando uma tensão de 10 volts. Foi de fato a primeira vez que foi realizada a precipitação química de fósforo por compostos de ferro no tratamento de esgotos domésticos (RYBICKI, 1999 apud SINOTI, 2004).

Nas décadas iniciais do século XX, este tipo de tratamento foi implantado em várias localidades nos EUA para tratamento de águas residuárias municipais. A partir da década de 30 todas as unidades foram abandonadas, com a alegação de que os custos operacionais eram altos e que havia alternativas melhores como forma de dosagem química dos coagulantes (HOLT et al., 2002 apud SINOTI et al., 2005).

Dentre os objetivos comuns dos processos eletroquímicos, quando aplicados a águas residuárias ressaltam-se: remoção de impurezas orgânicas dissolvidas em forma de produtos não tóxicos e insolúveis; remoção de impurezas inorgânicas dissolvidas, pela aplicação de eletrodiálise; remoção de sólidos insolúveis finalmente divididos e dispersos, pelo uso de coagulação, floculação e flotação eletrolítica; e desinfecção por produção de cloro, ou outros agentes desinfetantes, assim como pela simples passagem de corrente. Devido a esses fatores várias empresas vem adotando como tratamento a eletrólise, pois pode ser empregado em

distintos tipos de efluentes. Sua concepção está diretamente relacionada aos critérios químicos, econômicos, ambientais e de engenharia (SINOTI, 2004).

Em relação à aplicação da técnica eletrolítica para tratamento de chorume, Giordano et al. (2011) afirma que eles apresentam pequenas concentrações de sólidos em suspensão, o que a priori inviabilizaria a aplicação do processo para o seu tratamento. A aplicabilidade desse processo ao tratamento do chorume é explicada pela insolubilização dos compostos orgânicos presentes e é ainda favorecida pelas altas condutividades do chorume.

### **2.5.5 O Processo eletrolítico no tratamento de água**

O tratamento eletrolítico pode contribuir como tratamento alternativo ou complementar da água aos sistemas convencionais (biológicos e físico-químicos). Porém, existem poucos estudos na literatura sobre o uso do processo eletrolítico no tratamento de água.

Jiang et al. (2002 apud RODRIGUES, 2007) utilizaram a eletrocoagulação e eletroflotação para tratar água do rio Tamisa, Inglaterra. Usou eletrodos de alumínio e dois reatores de fluxo contínuo: um com fluxo horizontal e outro com fluxo ascendente, ambos com separador de material flotado. Foram aplicadas as seguintes densidades de corrente:  $20\text{A/m}^2$ ,  $30\text{A/m}^2$ ,  $50\text{A/m}^2$  e tempos de detenção entre 3 e 16h. Foi concluído que a eletrocoagulação obteve 20% a mais de remoção de matéria orgânica dissolvida que a coagulação convencional para as mesmas doses de Al (III), e que o reator de fluxo ascendente foi mais eficiente que o de fluxo horizontal.

Outro estudo foi o realizado por Otenio et al. (2008) onde a ideia principal da utilização do tratamento eletrolítico era sua ação bactericida para a substituição do cloro no pré-tratamento de águas. Foi um estudo pioneiro realizado na água proveniente do rio das Cinzas, Bandeirantes-PR. Os resultados obtidos foram eficientes.

### **3. METODOLOGIA**

O trabalho aborda uma pesquisa do tipo básica. Não envolveu aplicação prática prevista e tem uma abordagem qualitativa, não requereu o uso de métodos e técnicas estatísticas.

Com relação aos procedimentos técnicos trata-se de um levantamento a cerca de pesquisas realizadas por vários autores sobre o tema, objetivando fazer um estudo sobre a aplicação do processo eletrolítico no tratamento de efluentes e no tratamento de água, abordando suas vantagens, desvantagens e sua eficiência.

O levantamento dos dados foi feito por meio de revisão bibliográfica de materiais acadêmicos já publicados em livros, artigos, periódicos, anais de congressos, dissertações e teses de doutorados. Também, buscou-se informações em portarias e normas técnicas.

O ponto mais importante do estudo foi a obtenção de dados a cerca da aplicação do processo eletrolítico no tratamento de efluentes e de água. Para isto, foram analisados os fenômenos relacionados ao processo, os tipos de eletrodos e os parâmetros de controle.

Depois de feita toda a pesquisa sobre o tema, foram elaboradas tabelas, onde abordam as principais vantagens e desvantagens do processo eletrolítico no geral e com relação aos fenômenos associados a ele. Por fim, a última tabela tem o intuito de mostrar a eficiência de remoção de poluentes e para isso reúne características como tipo de efluente a ser tratado, o tipo de eletrodo e o tempo de detenção para obtenção do resultado.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Vantagens e Desvantagens

O Quadro 2 mostra as vantagens e desvantagens do processo eletrolítico que foram encontradas na literatura específica sobre o tema e que podem contribuir para a tomada de decisões para sua aplicação. Dentre os principais autores encontrados podem ser citados Angelis et al. (1998), Wiendl (1998), Rodrigues et al (2001), Sinoti (2004), Sinoti et al (2005) e Montenegro Junior (2011).

**Quadro 2: Vantagens e desvantagens do processo eletrolítico**

<b>Vantagens</b>	Facilidade de controle e operação; ocupa pequenos espaços; não requer a adição de produtos químicos; não leva a produção de resíduos tóxicos; utiliza elétron como reagente; capaz de produzir altas eficiências de remoção; eficiência independente da temperatura do efluente; baixo tempo de detenção, comparado com métodos biológicos; inexistência ou pouca incidência de odores fortes; reduzido custo de implantação devido ao menor volume de obras civis; baixo custo de manutenção; atende as exigências da legislação ambiental brasileira.
<b>Desvantagens</b>	Elevado consumo de energia; os eletrodos de ferro aumentam os valores de cor e turbidez; fragilidade das placas de grafite; necessidade de um maior número de pesquisas sobre a corrosão, desgaste e custo dos eletrodos; os eletrodos são consumidos e necessitam de substituição regular.

**Fonte:** elaborado pela autora.

Dentre as várias vantagens apresentadas na Tabela 2 as mais citadas pelos autores foram em relação à alta eficiência, facilidade de controle e operação e baixo custo de manutenção, o que contraria algumas desvantagens apresentadas. O desgaste total dos eletrodos e a necessidade de trocas regularmente acabam fazendo com que o processo tenha um alto custo de manutenção. Esse foi o motivo que levou alguns lugares como Crossness na Inglaterra, Santa Mônica e Oklahoma nos Estados Unidos da América a desativarem ou

abandonarem as estações de tratamento que utilizavam o processo eletrolítico. Geralmente o período de funcionamento tem coincidido com o desgaste total dos eletrodos.

Outra vantagem apresentada que pode ser considerada importante é a não adição de produtos químicos, pois, sem acrescentar esses produtos a quantidade de lodo formado é bastante menor, uma vez que, o lodo produzido contém altas concentrações do metal utilizado como eletrodo, podendo ser potencialmente perigoso, principalmente no caso do alumínio.

Outra contradição encontrada é em relação à vantagem de que a eficiência independe da temperatura do efluente, sendo que na literatura Wiendl (1998) afirma que quanto maior for a temperatura do efluente maior será a eficiência do processo eletrolítico.

Muitos autores consideram o processo eletrolítico como um processo ecologicamente limpo, porém começou a surgir dúvidas quanto à possibilidade de serem produzidas substâncias tóxicas, como os trihalometanos (THM) o que contradiz uma de suas vantagens.

Quanto ao elevado consumo de energia, alguns trabalhos citaram que o processo eletrolítico consumia mais energia que uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) local com tratamento secundário, e dez vezes mais do que um reator biológico.

Uma das desvantagens apresentadas foi a de que os eletrodos de ferro aumentam os valores de cor e turbidez, de fato isso foi comprovado em alguns estudos como o de Sinoti (2004), Formentini (2012) e Orsi (2014) onde afirmam que esse aumento está relacionado com a adição dos íons de  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$  que no processo de eletrocoagulação e eletrofloculação levam à produção dos flocos, modificando as propriedades dos efluentes que estão sendo tratados.

Além das vantagens e desvantagens apresentadas no Quadro 2 que servem para todos os fenômenos associados ao processo eletrolítico, foram encontradas também na literatura vantagens e desvantagens da aplicação dos processos de eletrocoagulação e eletrofloculação apresentadas nos Quadros 3 e 4, respectivamente.

**Quadro 3: Vantagens e desvantagens da eletrocoagulação.**

<b>Vantagens</b>	<p>O lodo formado é fácil de ser desidratado, por ser constituído principalmente, por óxidos e hidróxidos metálicos; os flocos formados são similares aos químicos, sendo maiores e contendo menos água ligada, é resistente aos ácidos e mais estável, sendo separado mais facilmente por filtração; produz menos sólidos totais dissolvidos (STD) comparados com os tratamentos químicos, sendo que se a água for para reuso, o menor nível de STD contribui para diminuir o custo de recuperação da mesma; remove partículas coloidais menores, pois o campo elétrico aplicado faz com que elas se movimentem mais rapidamente, facilitando a coagulação; evita a adição de produtos químicos, não havendo problemas de neutralizar excessos de substâncias químicas adicionadas e nem poluição secundária por altas concentrações, quando coagulantes químicos são usados; as bolhas produzidas durante a eletrólise podem carrear o poluente para a superfície, ficando mais concentrada, sendo mais fácil de ser coletada e removida, pela eletroflotação; pode ser utilizada convenientemente em áreas rurais, onde não há eletricidade, porém, através de painéis solares capazes de obter suficiente corrente elétrica para o processo.</p>
<b>Desvantagens</b>	<p>Os eletrodos de sacrifício são dissolvidos em água, como resultado da oxidação, e necessitam ser trocados regularmente; pode ser formado um filme de óxido impermeável, no catodo, diminuindo sua eficiência, pela passivação dos eletrodos; é necessário que o meio tenha alta condutividade; e os hidróxidos gelatinosos podem tender a solubilizar em alguns casos.</p>

**Fonte:** elaborado pela autora.



**Quadro 4: Vantagens e desvantagens da eletrofloculação.**

<b>Vantagens</b>	Há controle maior na liberação do agente coagulante, em comparação com os processos físico-químicos convencionais; os flocos formados são mais estáveis, podendo ser melhor removidos por filtração; remove as partículas coloidais menores, pois o campo elétrico aplicado promove mais rapidamente o contato entre elas, facilitando a coagulação; limita o uso de substâncias químicas, minimizando, conseqüentemente, o impacto negativo causado pelo excesso de xenobióticos lançados no ambiente, fato que acontece quando a coagulação química empregando polieletrólitos é utilizada no tratamento de efluentes; as bolhas de gás produzidas durante a eletrólise podem levar o contaminante ao topo da solução, onde pode ser concentrado e removido mais facilmente; a célula eletrolítica é eletricamente controlada, não necessitando de dispositivos adicionais, o que requer menos manutenção; a técnica pode ser usada convenientemente em áreas rurais onde a eletricidade não é disponível, desde que um painel de energia solar seja acoplado a unidade.
<b>Desvantagens</b>	Um filme de óxido impermeável pode ser formado no cátodo, conduzindo à perda de eficiência da unidade; é requerida alta condutividade do efluente.

**Fonte:** elaborado pela autora.

As vantagens e desvantagens apresentadas nos Quadros 3 e 4 devem ser levadas em consideração, para a análise de qual processo é o ideal para os diferentes tipos de efluentes a serem tratados.

Autores como Sinoti et al. (2005) e Sinoti (2014) acrescentam ainda que a junção entre a eletrocoagulação e a eletrofloculação se mostrou como um procedimento importante na remoção dos seguintes parâmetros: matéria orgânica, cor, turbidez, fósforo (orto-fosfato e fósforo total) e também para a amônia, apesar de apresentar baixa remoção.

Em relação ao fenômeno da eletroflotação, Sinoti (2014) afirma que ela tem se mostrado como uma técnica eficiente na remoção do material particulado produzido, em consequência dos mecanismos de eletrocoagulação e eletrofloculação. Entretanto, o custo desse processo poderá ser alto, devido ao tempo de vida dos ânodos. Portanto, para o melhor

uso desse mecanismo devem-se buscar tipos de materiais mais baratos para a construção de eletrodos e em aplicações onde seu custo se justifique, tais como, rejeitos industriais, ou outros casos onde a disposição é cara.

## 4.2 Eficiência

No Quadro 5 são mostradas algumas características como tipo de efluentes, material do eletrodo, tempo de detenção e a eficiência de remoção de poluentes específicos de trabalhos apresentados na literatura utilizando o tratamento eletrolítico.

**Quadro 5: Eficiência de remoção do tratamento eletrolítico.**

Referência	Efluente	Eletrodo	Tempo	Eficiência (%)
Giordano et al., 2000	Esgoto sanitário	-	10 min	DBO=85, DQO=90, fósforo=85
Rodrigues et al., 2001	Efluentes de UASB	Alumínio	1 hora	Turbidez=77,25, SS=76,5, DQO=80,48
		Ferro		Turbidez=69,45, SS=57,94, DQO=55,66
Fornari, 2007	Industrial	Ferro	2 horas	Turbidez=99, DQO=56, ST=57, STF=21, STV=86, cromo=99, cálcio=79, potássio=60, zinco=89
		Alumínio		Turbidez=98, DQO=80, ST=45, STF=45, STV=70, cromo=97, cálcio=74, potássio=90, zinco=90
Ciciliato et al., 2011	Doméstico	Ferro	1h e 40 min	DQO=94, turbidez=4, cor=0
Formentini, 2012	Esgoto sanitário	Alumínio	20 min	DQO=82,89
		Ferro		DQO=86,14
Orsi, 2014	Industrial	Alumínio	30 min	SS=78,5, alumínio=70, chumbo=93, DQO=90
Maia, 2014	Doméstico	Alumínio	40 min	DQO=86,01, turbidez=91,67
		Aço carbono		DQO=81,64, turbidez=89,61
Avellar et al., 2015	Doméstico	Ânodo: alumínio, cátodo: aço	1 h e 15 min	Fósforo= 93

**Fonte:** elaborado pela autora.

No Quadro 5 o tempo de detenção máximo utilizado foi de 2 horas, porém, valores ótimos de remoção de poluentes foram obtidos em muitos trabalhos com apenas 10 minutos do processo eletrolítico. É importante destacar que todos os autores utilizaram outros

parâmetros de controle do processo onde os mais comuns entre os trabalhos foram o pH e a condutividade.

O estudo realizado por Giordano et al. (2000) atingiu ótimos resultados de eficiência na remoção de DBO (85%), DQO (90%) e fósforo (85%) com apenas 10 minutos de processo eletrolítico, mas o trabalho não tinha nenhuma informação quanto ao tipo de eletrodo utilizado.

Nos resultados atingidos por Rodrigues et al. (2001) o maior valor obtido foi em relação a eficiência de remoção da demanda química de oxigênio (DQO) com eletrodo de alumínio (80,48%), e o menor foi com eletrodo de ferro (55,66%). Comparando-se as porcentagens de remoção de DQO, percebe-se que os eletrodos de alumínio são mais eficientes que os de ferro quanto a essa característica, isso também é visível no trabalho de Fornari (2007) onde alcançou redução de DQO de 56% com eletrodos de ferro e de 80% com eletrodos de alumínio. Já no trabalho de Formentini (2012) observa-se que o processo eletrolítico com ambos os eletrodos, de alumínio ou ferro, mostrou-se eficiente para remoção de DQO.

No trabalho de Ciciliato et al. (2011) pode-se observar que não teve eficiência nenhuma em relação a cor e pouquíssima eficiência na remoção de turbidez (4%), a explicação dada pelo autor é de que o contato com o ar atmosférico após o término do experimento, favoreceu a formação de óxido férrico, que deu a coloração avermelhada ao efluente. Em relação à remoção de DQO, o processo com eletrodo de ferro foi bastante eficiente (94%).

Um fato importante a ser destacado sobre o trabalho de Orsi (2014) é que ele também realizou estudos com eletrodos de ferro. Entretanto, como o efluente foi afetado e todos os equipamentos com que este entrou em contato durante o processo: os tubos de ensaio, os papéis filtrantes e os resíduos tiveram sua tonalidade alterada para cor de ferrugem, ele considerou que o uso do ferro como anodo, apesar da efetividade obtida, poderia gerar um efluente de aparência questionável, além de interferir no processo através da corrosão dos equipamentos. Então, decidiu substituir os eletrodos de ferro por alumínio.

Maia (2014) e Avellar et al. (2015) utilizaram, além do alumínio, o aço como eletrodo, onde obtiveram resultados satisfatórios de remoção de DQO, turbidez e fósforo.

De forma geral, percebe-se que os resultados do tratamento eletrolítico apresentados no Quadro 5 com eletrodos de alumínio foram mais eficientes quando comparados com os eletrodos de ferro.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O processo eletrolítico pode ser utilizado para tratar tanto água como efluentes, porém, de acordo com a literatura apresentada ele é mais utilizado no tratamento de efluentes domésticos e industriais.

Entre os tipos diferentes de eletrodos utilizados pelas pesquisas consultadas destacam-se os de ferro e alumínio. Eles se mostraram eficientes na remoção de DQO, turbidez, sólidos e nutrientes, sendo que os eletrodos de alumínio apresentaram melhor eficiência em quase todos os trabalhos citados.

Pode-se dizer que o baixo tempo de detenção é uma das principais vantagens do processo eletrolítico, pois com 10 minutos já se pode obter resultados satisfatórios.

Dentre os vários trabalhos analisados os comentários mais comuns foram à alta eficiência, facilidade de execução e baixo custo de manutenção, o que contraria as desvantagens apresentadas.

Dos estudos citados na literatura pouco se falou de ETE em escala real de funcionamento, a maior parte dos estudos foram realizados em batelada. Dessa forma, este processo merece um número maior de pesquisas, para que todos os mecanismos que atuam nas remoções de poluentes e nutrientes sejam bastante conhecidos, e que sejam minimizadas todas as condições que possam ter levado às desativações de ETEs no passado, e também um estudo mais detalhado sobre a corrosão, desgaste, custo dos eletrodos, gastos de implementação e de consumo energético específicos do processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEGRE, R.M. e DELGADILLO, S.A.M., (1993). **Tratamento eletrolítico de efluentes de refinaria de petróleo (parte I)**. Revista DAE. N 171, p. 9-12.

ALEGRE, R.N. e DELGADILLO, S.A.M. **Uso da eletrólise na depuração de correntes líquidas contendo óleos e graxas emulsificados (Parte II)**. Revista DAE, São Paulo - SP, n. 173, p.9-15, setembro-outubro- 1993.b.

ANGELIS, D. F.; CORSO, C. R.; BIDOIA, E. D.; MORAES, P. B.; DOMINGOS, R. N.; ROCHA-FILHO, R. C. **Eletrolise de Resíduos Poluidores. I – Efluente de uma Indústria Liofilizadora**. QUÍMICA NOVA, 21(1). 1998.

ARCHELA, E.; CARRARO, A.; FERNANDES, F.; BARROS, O. N. F.; ARCHELA, R. S. **Considerações sobre a geração de efluentes líquidos em centros urbanos**. Geografia - Volume 12 - Número 1 - Jan/Jun. 2003.

ATKINS, P. W. (1990). **Physical chemistry**, 4a edição – Editora Oxford, p 995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 9800:1987. **Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário**. Disponível em: <<http://docslide.com.br/documents/nbr-9800-nb-1032-criterios-para-lancamento-de-efluentespdf.html>>. Acesso em: 05 de Abril de 2017.

AVELLAR, I. G. J.; COTTA, T. A. P. G.; NEDER, A. V. F. **Aplicação de eletrocoagulação na remoção de fosfatos em efluente doméstico artificial preparado a partir de bebida refrigerante - Um Experimento para Graduação**. Rev. Virtual Quim., 2015, 7 (6), 2255-2272. Data de publicação na Web: 21 de outubro de 2015.

BRASIL ESCOLA. **Função da eletrólise**. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/quimica/funcao-eletrolise.htm>>. Acesso em: 05 de Abril de 2017.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria Nº 2.914, 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. Disponível em: <<http://portalarquivos.saude.gov.br/images/pdf/2015/maio/25/Portaria-MS-no-2.914-12-12-2011.pdf>>. Acesso em: 03 de Abril de 2017.

BRITO, R. S., (1943). **Depuração das águas dos esgotos**. Obras Completas, vol. II, Imprensa Nacional.

CERQUEIRA, A. A.; MARQUES, M. R. C.; **Electrolytic treatment of wastewater in the oil industry**. New Technologies in the Oil and Gas Industry, Ed. Rijeka, Croatia: INTECH, cap. 1, 2012.

CERQUEIRA, A. A.; **Aplicação da técnica de eletrofloculação utilizando corrente alternada de frequência variável no tratamento de água de produção da indústria do**

**petróleo.** Tese (Doutorado). Pós-graduação em Meio Ambiente, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 133f. Rio de Janeiro, 2011.

CHAGAS, W. F. **Estudo de patógenos e metais em lodo digerido bruto e higienização para fins agrícolas, das estações de tratamento de esgotos da Ilha do Governador e da Penha no Estado do Rio de Janeiro.** 2000. 89 f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Programa da Fundação Oswaldo Cruz. Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, 2000.

CHEN, G., **Electrochemical technologies in wastewater treatment, separation and purification technology** 38, p 11–41, 2004.

CICILIATO, R. C.; NAGAMINI, R. C.; CRUZ, K. T. S.; PINHEIRO, A. L. N. **Tratamento eletrolítico de águas cinza utilizando eletrodo de ferro.** In: II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2011, Londrina/PR. Anais do II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Londrina/PR, 2011.

COMNINELLIS, C. **Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment** - Electrochimica Acta, 39, (11/12), p1857-1862. 1994.

CRESPILHO, F. N.; SANTANA, C. G.; REZENDE, M. O. O., **Tratamento de efluente de indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação.** Química Nova, vol 27, n 3, p. 387-392, 2004.

DI BERNARDO, L. (1993). **Métodos e técnicas de tratamento de água,** Rio de Janeiro, RJ, Editado pela ABES (Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental), p.443.

FENG, Y. J. E LI, X.Y. **Electro-catalytic oxidation of phenol on several metal-oxide electodes in aqueous solution** - Water Research 37, p. 2399-2407, (2003).

FILHO, I. N.; MUHLEN, C. V.; CAMARÃO, E. B. **Estudos de compostos orgânicos em lixiviados de aterros sanitários por EFS e CG/EM.** Química Nova, Vol. 24, No. 4, 554-556, 2001.

FORMENTINI, D. F. **Tratamento eletrolítico de esgotos sanitários.** Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-graduação em Energia na Agricultura, pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR: UNIOESTE, 2012. 125 p.

FORNARI, M. M. T., **Aplicação da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de curtume.** Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, campus Toledo, 2007. Toledo-PR.

FORNAZARI, A. L. T.; MALPASS, G. R. P.; MIWA, D. W.; MOTHEO, A. J.; **2nd International workshop - advances in cleaner production,** São Paulo, Brasil, 2009.

FREIRE, R. S.; PELEGRINI, R.; KUBOTA, L. T.; DURÁN, N.; PERALTA-ZAMORA, P. **Novas tendências para o tratamento de resíduos industriais contendo espécies organocloradas.** Química Nova, v. 23, n. 4, p. 504-511, 2000. ISSN 1678-7064.

BESSA, M. F. **Tratamento de água para consumo humano**. Rio de Janeiro: Fiocruz, 1997. Apostila.

GIACON, R. L. **Tratamento de águas residuárias da industrialização de frutas cítricas pelo processo eletrolítico**. 1993. 200 p. Monografia (Mestrado em Engenharia Civil, Área de Concentração: Saneamento e Recursos Hídricos). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 1993

GIORDANO, G.; FILHO, O. B.; CARVALHO, R. J. **Processos físico-químicos para tratamento do chorume de aterros de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: COAMB / FEN / UERJ / 2011. Série Temática: Tecnologias Ambientais - Volume 4. 178 p. ISBN: 978-85-64386-04-4. 2011

GIORDANO, G. e FILHO, O. B. **O Processo eletrolítico aplicado ao saneamento ambiental de balneários**. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Alegre-RS. Anais da Editora ABES, Rio de Janeiro, 2000.

GIORDANO, G. **Tratamento e controle de efluentes industriais**. Rio de Janeiro, RJ, p.5-6, 2004.

HOLT, P.K., BARTON, G.W., MITCHELL, C.A.,. **The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology**. Chemosphere 59 (3), 355–367, 2005.

HOLT, P. K., BARTON, G. W., WARK, M. E MITCHELL, C. A. **A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation** - Colloids and Surfaces A: physicochemical and engineering aspects, 211 (2 – 3), p. 233-248. 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA: **Banco de dados. Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <<http://7a12.ibge.gov.br/vamos-conhecer-o-brasil/nosso-povo/caracteristicas-da-populacao.html>>. Acesso em: 05 de Abril de 2017.

JIANG, J. Q, GRAHAM, N.; ANDRÉ, C.; KELSALL, G. H.; BRANDON, N. **Laboratory study of electrocoagulation-flotation for water treatment**. Water Research vol. 36: 4064-4078. 2002.

MONTENEGRO JUNIOR, R. S. **Estudo da viabilidade técnica do método eletroquímico no tratamento da água produzida nos processos de exploração do petróleo**. Monografia de Especialização em Gestão no Setor Petróleo e Gás. Universidade Candido Mendes, Rio de Janeiro, 2011. 52 f.

JÜTTNER, K., GALLA, U. e SCHMIEDER, H. **Electrochemical approaches to environmental problems in the process industry**. Electrochimica Acta, 45, (15-16), 2000, p.2575-2594.q12

LIMA, G. J. A. **Uso de polímero natural do quiabo como auxiliar de floculação e filtração em tratamento de água e esgoto**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental – Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Controle da poluição Urbana e Industrial. Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ. Rio de Janeiro, 2007. 113 p.

LINGANE, J. J. **"Eietroanalytical chemistry"**. segunda edição, Interscience Publishers, Inc., New York, julho, 1970.

LIN, S. H.; PENG, C. F. **Continuous treatment of textile wastewater by combined coagulation, eletrochemical oxidation and activated sludge**. Water Research, Great Britain, vol. 30, n.3, p. 587-592, 1996

MAIA, L. G. C. **Estudo do processo de eletrocoagulação/floculação aplicado ao polimento de efluente doméstico**. Fortaleza, 2014. 95 f. Dissertação de Mestrado em Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Ceará, 2014.

MANCUSO, Pedro Caetano Sanches; SANTOS, Felício dos Santos. **Reuso de água**. Barueri, São Paulo: Manole, 2003.

MARTÍNEZ-HUITLE, C. A.; FERRO, S. **Electrochemical oxidation of organic pollutants for the wastewater treatment: direct and indirect processes**. Chemical Society Reviews, v. 35, n. 12, p. 1324-1340, 2006.

MIRANDA, L. A. S.; MONTEGGIA, L. O. **Sistemas e processos de tratamento de águas de abastecimento**. Guia do profissional em treinamento, nível 2. Porto Alegre: (S. n.), 2007. 148p.

MOHAMMAD, M. E., MUTTUCUMARU, S. **Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes**. Journal of Environmental Management 90, p. 1663–1679, 2009.

MOLLAH, M. Y. A.; Schennach, R.; Parga, J. R.; Cocke, D. L. **Electrocoagulation (EC) — science and applications**. Journal of Hazardous Materials, 1, 84, 2001.

MORAES, Peterson B. **Tratamento físico químico de efluentes líquidos. Tratamento biológico de efluentes líquidos**. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas – CESET, Curso Superior de Tecnologia em Saneamento Ambiental, 2008.

MORGAN, S. M. & VESILIND, P. A. **Introdução à engenharia ambiental**. Tradução da 2ª Edição norte-Americana. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

MOURA, D. C. **Aplicação de tecnologias eletroquímicas (oxidação via radicais hidroxila, oxidação mediada via cloro ativo e eletrocoagulação) para o tratamento de efluentes reais ou sintéticos**. 2014. 166f. Tese Doutorado em Química - Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil, 2014.

ORSI, M. C. V. L. **Aplicação do processo eletrolítico no tratamento de efluentes de uma indústria de recuperação de filmes plásticos pós-consumo**. Bauru, 2014. 127 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2014.

OTENIO, M. H.; PANCHONI, L. C.; CRUZ, G. C. A.; RAVANHANI, C.; BIDÓIA, E. D. **Avaliação em escala laboratorial da utilização do processo eletrolítico no tratamento de águas**. Quim. Nova, Vol. 31, No. 3, 508-513, 2008.



OTENIO, M. H.; TURININI, E. M.; BIDÓIA, E. D. ; SILVA, N. M. M. G.; e SANTOS, V. **Avaliação (em escala laboratorial) da aplicação do processo eletrolítico em efluente de lagoa de estabilização de esgoto urbano.** Quim. Nova, Vol. 33, No. 3, 557-561, 2010.

PHILLIPI JR. A., ROMÉRIO, M. A., BRUNA, G. C., (Eds). **Curso de gestão ambiental.** Barueri – SP, Editora Manole. 1ª ed., v. 01, 1045 p., 2004. Cap. 3 – Controle Ambiental da Água p. 70-78.

PULGARIN, C.; ADLER, N.; PÈRINGER, P.; e COMMINELLIS, C. **Eletrochemical detoxification of a 1,4 - benzoquinone solution.** In Wastewater Treatment Wat. Res., Great Britain, v. 28, n.4, p. 887-893, 1994.

QUEIROZ, M.S, MAURO, C A, RIBEIRO, C. e ABREU, E.S.V. **Processo eletrolítico: uma nova tecnologia para tratamento de efluentes da indústria do petróleo.** In: 5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PETRÓLEO, Rio de Janeiro, 1994.

RECESA. **Qualidade da água e padrões de potabilidade: abastecimento de água.** Guia do profissional em treinamento, nível 2. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). Belo Horizonte: ReCESA, 2007. 80 p.

RODRIGUES, M. C.; BRITO, R. S.; SINOTI, A. L. L.; SOUZA, M. A. A. **Tratamento eletrolítico de efluentes de reatores anaeróbios.** In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001, João Pessoa-PB. Anais Editora ABES, Rio de Janeiro, 2001.

RODRIGUES, M. C. **Tratamento eletrolítico de lixiviado de aterro sanitário.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007; 123 p.

RUSSEL, J.B. **Química Geral**, 2. ed.,v.2, Mc Graw-Hill, Rio de Janeiro, 1994, 892p.

SÁ, L. F.; JUCÁ, J. F. T.; SOBRINHO, M. A. M. **Tratamento do lixiviado de aterro sanitário usando destilador solar.** Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science: v. 7, n. 1, 2012.

SAMUEL, P. R. S. **Alternativas sustentáveis de tratamento de esgotos sanitários urbanos, através de sistemas descentralizados, para municípios de pequeno porte.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011. 170 p.

SILVA, P. C. F.; MAINIER, F. B. 2006. **Tratamento eletrolítico de resíduos líquidos gerados em indústria mecânica fabricante de equipamentos para produção de petróleo.**

SILVA, A. C. C. **Descontaminação do efluente da ETE-UFRN via abordagem eletroquímica: avaliação da eficiência e toxicidade.** 2016. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal/RN, 2016. 61 f.

SINOTI, A. L. L. (2004). **Processo eletrolítico no tratamento de esgotos sanitários: estudo da sua aplicabilidade e mecanismos associados.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia

Ambiental e Recursos Hídricos), Publicação PTARH.DM - 12 / 04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 143 p.

SINOTI, A. L. L.; SOUZA, M. A. A. **Processo eletrolítico no tratamento de esgotos sanitários: estudo da sua aplicabilidade e mecanismos associados.** In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005, Campo Grande/MS. Anais Editora ABES, Rio de Janeiro, 2005.

SOBRINHO, P.A. e ZIMBARDI, W. **Tratamento de esgotos de áreas litorâneas por processo eletrolítico.** In: 13º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1987, São Paulo. Anais Editora ABES, Rio de Janeiro, 1987, v.2, tomo I, p.136-155.

SOUZA, W. A. **Tratamento de água.** Natal: CEFET/RN, 2007. 149p. ISBN: 978-85-89571-37-1.

TEIXEIRA, C. P. de A. B.; JARDIM, W. de F. **Processos oxidativos avançados: conceitos teóricos.** Caderno temático, v. 3. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Instituto de Química – IQ, Laboratório de Química Ambiental – LQA. Campinas, 2004.

TERA AMBIENTAL. **Como funciona o tratamento de efluentes industriais.** 2013b. Disponível em: <<http://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/bid/338190/Como-funciona-o-tratamento-de-efluentes-industriais>>. Acessado em 19 de Março de 2017.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: DESA – UFMG, 1995.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 2ª edição. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; Editora SEGRAC. 1996. 243 p.

WIENDL, W. G. (1998). **O processo eletrolítico no tratamento de esgotos sanitários,** Rio de Janeiro, RJ, ABES, 368 p.