



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

FELIPE MARTINS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DE VIABILIDADES TÉCNICAS DO PROCESSO DE
DESINFECÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO POR PROCESSO ELETROLÍTICO**

Taubaté-SP

2020



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

FELIPE MARTINS DE OLIVEIRA

**ESTUDO DE VIABILIDADES TÉCNICAS DO PROCESSO DE
DESINFECÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO POR PROCESSO ELETROLÍTICO**

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. Antônio Faria Neto

Taubaté-SP

2020

A confecção da ficha catalográfica é realizada exclusivamente pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação e deve ser inserida no lugar desta folha.



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

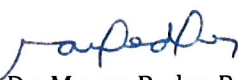
**ESTUDO DE VIABILIDADES TÉCNICAS DO PROCESSO DE
DESINFECÇÃO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE
ESGOTO POR PROCESSO ELETROLÍTICO**


FELIPE MARTINS DE OLIVEIRA

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. Antônio Faria Neto
Orientador/UNITAU-DEE


Prof. Dr. Mauro Pedro Peres
UNITAU-DEE


Prof. Me. Leonardo do Nascimento Lopes
UNITAU-DEC

Novembro de 2020

Aos meus pais (Cleonice e Virgínio), irmã (Marcela) e namorada (Francielle).

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Cleonice e Virginio, que não deixaram de me apoiar nessa trajetória em nenhum momento, garantindo-me sempre sustento, teto, alimento e amor.

Agradeço também minha namorada Francielle, que sempre esteve ao meu lado incentivando, ajudando e acrescentando.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antônio Faria Neto, por todo auxílio, dedicação e assistência com meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino, o presente trabalho nasceu com os estudos que realizei com seu auxílio, e, inclusive, estendo os agradecimentos aos funcionários da empresa Aratu Ambiental, local em que desenvolvi o estudo de forma prática, especialmente ao senhor Vinícius e ao Willian.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UNITAU e de toda a instituição: docência, limpeza, administrativo e sistemas, sendo este último setor de suma importância em nossa trajetória final - permitindo que fosse possível manter nosso tempo de conclusão para que a formação em engenharia elétrica fosse obtida conforme planejei.

“Nenhuma decisão sensata pode ser tomada sem que se leve em conta o mundo não apenas como ele é, mas como ele virá a ser.”

Isaac Asimov

RESUMO

Este projeto visa o domínio da tecnologia de desinfecção e pós-tratamento de efluente para promover a redução de patógenos de água residuária sem a presença de produtos químicos utilizando o processo eletrolítico. Assim, o **objetivo** definido é avaliar se o processo de eletrólise é capaz de substituir a cloração no tratamento de água. O **método** consiste no levantamento bibliográfico sobre a legislação quanto a desinfecção mínima para o uso da água tratada somado aos estudos e protótipo aplicados em uma empresa de tratamento de água, na cidade de Taubaté-SP, utilizando um tanque eletrolítico de escala reduzida com eletrodos de alumínio. Como **resultado** é obtido um sistema, ainda em fase amostral, que opera em fluxo contínuo de baixa vazão e que pode ser aplicado para fins: irrigatórios na agricultura, pecuários e de consumos diversos dos seres humanos; atendendo às exigências sanitárias, se enquadrando na viabilidade financeira da estação de tratamento de água e reduzindo riscos ambientais. E, como **considerações finais**, são apontadas necessidades para desenvolvimento em escala real do projeto, as quais são compostas do manutenção de uma vazão constante para o estudo do tempo de detenção mínimo, de um estudo do nível de eficiência ao se aproximar eletrodos e da determinação do tempo de troca dos eletrodos.

PALAVRAS-CHAVE: Água. Alumínio. Cloro. Desinfecção. Efluente. Eletrólise. Eletrolítico. Tratamento.

ABSTRACT

This project aims to understand and control the technology of disinfection e post treatment of effluents to reduce the pathogens of wastewater without use of chemical products utilizing the electrolytic process. Therefore, the defined **objective** is to evaluate if the electrolytic is capable of replace the chlorination in water treatment. The **method** consists of bibliographic survey about the legislation on minimal disinfection for the use of potable water plus studies and prototype applied in a water treatment company, in the city of Taubaté-SP, utilizing a small-scale electrolytic tank with aluminium electrodes. As a **result**, a system is obtained, still in sampling phase, which operates in continuous flow of low flow rate and can be applied for purposes: irrigatory in agriculture, livestock and of various human consumes; attending health requirements, fitting on the budget of the water treatment company and reducing environmental risks. And as **finals considerations**, necessities to the development of real scale project are pointed, which take into account: the constant flow to the study of minimum detection time, a study of the efficiency level when the electrodes are brought closer together and the time it takes to swap the electrodes.

KEYWORDS: Water. Aluminium. Chlorine. Desinfection. Effluents. Electrolysis. Electrolytic. Treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Eletrólise do cloreto de sódio fundido.	18
Figura 2 – Representação do fluxo do efluente (vista lateral do protótipo).	24
Figura 3 – Protótipo desenvolvido.	25
Figura 4 – Amostra de referência após incubação.	26
Figura 5 – Amostras A1 e A2 após incubação.	27
Figura 6 – Amostras A3 e A4 após incubação.	28
Figura 7 – Amostras A5 e A6 após incubação.	28
Figura 8 – Célula eletrolítica.	35
Figura 9 – Detalhes da célula eletrolítica.	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores dos parâmetros durante os testes.	29
Tabela 2 – Valores potência e vazão.	29
Tabela 3 – Resultados dos testes de desinfecção.....	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TDH	Tempo de Detenção Hídrica
TG	Trabalho de Graduação
THM	Trihalometanos
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 OBJETIVO.....	15
1.2 JUSTIFICATIVA.....	15
1.3 DELIMITAÇÃO.....	15
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 PROCESSO ELETROLÍTICO.....	17
2.2 REATOR ELETROLÍTICO.....	19
2.3 PROCESSO ELETROLÍTICO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	21
2.3.1 Eletrólise do efluente.....	22
2.3.2 Eletrofloculação (eletrocoagulação / eletroflotação).....	22
2.3.3 Eletro-oxidação.....	23
3 DESENVOLVIMENTO.....	24
3.1 ESPECIFICAÇÕES DO PROTÓTIPO CONSTRUÍDO.....	24
3.2 TESTES COM O PROTÓTIPO E DADOS OBTIDOS.....	25
4 RESULTADOS.....	30
5 CONCLUSÃO.....	32
5.1 TRABALHOS FUTUROS.....	33
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

A água tem sido um dos recursos mais importantes para a formação e manutenção de sociedades humanas ao longo da história e, sendo a água um recurso finito, sua desinfecção e tratamento têm igual importância (UNICEF, 2019).

Atualmente o principal método de tratamento de água consiste nas etapas de decantação, filtração, desinfecção com cloro e fluoretação. Tais etapas são responsáveis, respectivamente, por: retirar componentes sólidos da água, retirar partículas menores, eliminar patógenos como bactérias e protozoários e, por último, prevenir cáries (CDC, 2020).

A água pode conter metano de origem orgânica diluído, que em contato com o cloro gera os trihalometanos (THM) que são compostos cancerígenos. O transporte rodoviário do cloro na forma sólida oferece um risco ambiental importante, já que um acidente pode impactar seriamente o meio ambiente. Por conta deste risco os altos valores do seguro da carga aumentam significativamente o custo do transporte, aumentando os inconvenientes desta técnica de tratamento de água (CLUGG, 2012).

O tratamento da água com luz ultravioleta (UV) e o tratamento eletrolítico podem ser duas alternativas viáveis para a substituição da fase que utiliza o cloro. O tratamento com luz UV não funciona eficazmente em águas turvas sem filtração (GONÇALVES *et al.*, 2003). Já a alternativa eletrolítica é capaz de, além de desinfetar a água, também retirar matéria sólida, sendo assim uma opção a se considerar.

O uso desses processos também apresenta a vantagem de ter a possibilidade de gerar a energia que consomem perto ou até no lugar em que foram instalados, por placas fotovoltaicas por exemplo, e, no caso do processo eletrolítico, que há necessidade de ser adquirido alumínio para sua realização, considera-se que o transporte deste material é mais fácil que o do cloro.

Contudo, é necessário medir o consumo de energia elétrica e determinar quanto de energia é necessário usar para atingir a mesma desinfecção pelo cloro, a fim de determinar o tempo que o processo pode demorar e o custo. O presente trabalho verifica as questões levantadas no que diz respeito ao processo de eletrólise.

1.1 OBJETIVO

Esse trabalho de graduação (TG) tem como objetivo avaliar se o processo de eletrólise é capaz de substituir a etapa de cloração no tratamento de água.

1.2 JUSTIFICATIVA

O maior interesse nesse trabalho vem do potencial de simplificar o tratamento moderno o que pode resultar em uma diminuição do custo para a empresa de tratamento, menor risco ambiental devido a uma utilização reduzida do cloro e uma melhora para a saúde dos consumidores com a eliminação dos THM da água.

1.3 DELIMITAÇÃO

Esse estudo foi feito em uma empresa de tratamento de água na cidade de Taubaté-SP e se restringiu a utilizar um tanque de escala reduzida, que utiliza eletrodos de alumínio, usado geralmente para teste dos efluentes líquidos a serem recebidos pela estação de tratamento, que são todo o acúmulo de água proveniente de dejetos, seja este dejetos natural (como a chuva) ou obtido de forma artificial como o que é descartado após um banho doméstico ou descarga em vaso sanitário. No processo para medir o tempo, tensão, corrente e coliformes totais, usou-se água de aterro sanitário.

2 REVISÃO DA LITERATURA

No presente trabalho é apresentado um estudo de viabilidades, tanto técnica quanto econômica, para o processo de desinfecção de uma estação de tratamento de esgoto através do processo eletrolítico. Tal estudo é necessário ao compreender e perceber a importância da água para a humanidade, uma vez que, mesmo visualmente em abundância em grandes partes do planeta, faz-se presente o conhecimento de que se trata de um recurso finito, sendo assim, é de suma importância encontrar meios para sua desinfecção e tratamento.

Conforme introduzido anteriormente, o método mais utilizado no tratamento de água consiste nas etapas de decantação, filtração, desinfecção com cloro e fluoretação, sendo elas responsáveis, respectivamente, por: retirar componentes sólidos da água, retirar partículas menores, eliminar patógenos como bactérias e protozoários e, por último, prevenir cáries. As intenções e resultados obtidos através do método exposto no presente parágrafo são bons, porém, apontando principalmente o cloro como um potencial inimigo químico, considera-se que deve ser levado em conta, visando urgência na busca por um tratamento de água alternativo, os seguintes pontos:

- É comum a presença de metano de origem orgânica na água, então, ao considerar um tratamento usual, ocorreria em um dos momentos o contato com o cloro, e conseqüentemente seriam gerados os THM que são compostos cancerígenos (CLUGG, 2012);
- Há um risco ambiental relevante sobre o transporte rodoviário do cloro na forma sólida, um acidente com uma carga dessa periculosidade pode danificar uma grande área e obter danos na fauna e na flora praticamente irreversíveis por anos (CLUGG, 2012);
- E é por conta do risco ambiental citado acima que os valores do seguro para o transportador desse tipo de carga aumentam significativamente, trazendo um último ponto, mas não menos importante, sobre a desvantagem do tratamento de água que ainda depende de cloro (CLUGG, 2012).

Felizmente existem duas alternativas de tratamento de água que não fazem uso do cloro e que podem ser exploradas e aplicadas, sendo elas o tratamento da água com luz UV e o tratamento eletrolítico.

O tratamento com luz UV não é eficaz em águas turvas sem filtração prévia. Já a alternativa eletrolítica é capaz de desinfetar a água e retirar matéria sólida, fazendo dela o processo escolhido para este TG, acrescentando também que, tal processo faz uso de alumínio, matéria de transporte mais simples e menos perigoso que o cloro.

Uma vez escolhido o processo eletrolítico para ser explorado no presente trabalho, orienta-se que, para usos reais (grandes escalas), o consumo de energia elétrica por esse processo precisa ser verificado, a fim de saber quanto de energia será gasto para obter a mesma desinfecção pelo cloro, determinar o tempo de conclusão e o custo. No fator custo, mesmo que em um primeiro momento ele se apresente desvantajoso, é possível estudar alternativas, como por exemplo a de autogeração de energia, tornando-o assim viável financeiramente e trazendo consigo todas as demais vantagens.

2.1 PROCESSO ELETROLÍTICO

No que tange a eletrólise, faz-se necessário tomar conhecimento de algumas classificações:

- Eletrodos: materiais condutores, geralmente metálicos, que vão compor as placas ou bastões;
- Cátodo: o eletrodo que recebe a carga negativa;
- Ânodo: o eletrodo que recebe a carga positiva;
- Eletrólitos: são compostos por ácidos, bases e/ou sais na forma líquida ou diluídos em solventes, como água, vão compor o líquido onde os eletrodos serão submergidos.

Sobre os eletrodos, sabe-se que metais ou substâncias que apresentam condutividade metálica, como o grafite por exemplo, produzem calor e campo magnético quando uma corrente elétrica passa por eles, mas não sofrem reações químicas; porém quando submersos em substâncias eletrolíticas, ou eletrólitos, vão sim sofrer reações químicas.

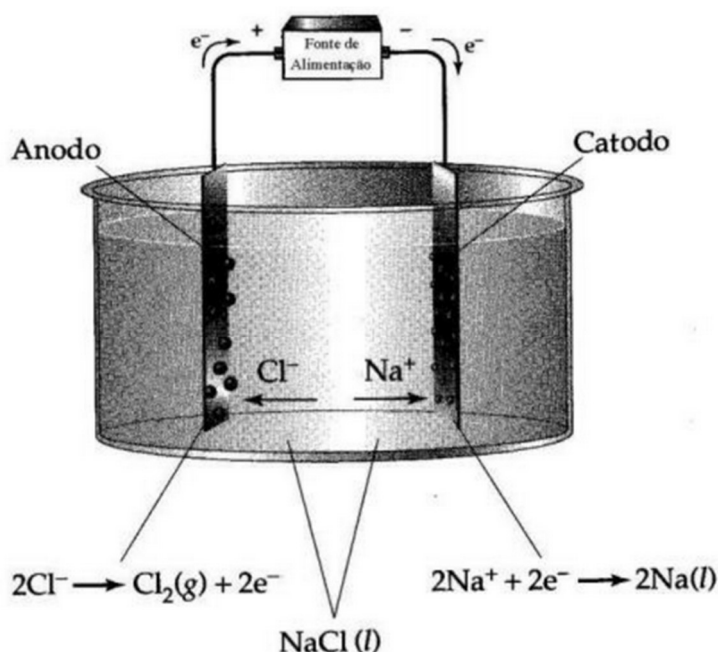
No cátodo essas reações se manifestam na forma de deposição de material no eletrodo, liberação de hidrogênio e formação de bases ou outras reações químicas de redução.

E no ânodo a manifestação se dá pela “corrosão” do eletrodo, liberação de material, produção de oxigênio e um ácido, ou outras reações químicas de oxidação.

Um eletrólito pode ser preparado pela dissolução de uma substância, assim, o que torna essas soluções um eletrólito forte é quanto das suas moléculas são dissociados em íons (partículas eletricamente carregadas). Quando um eletrólito é submetido a uma tensão elétrica, através de eletrodos, os íons positivos vão para o cátodo e os íons negativos para o ânodo. Em contato com os eletrodos os íons irão doar carga elétrica para o eletrodo, desencadeando na redução do eletrodo (adicionar carga elétrica do eletrodo) e na oxidação do eletrodo; nos dois casos os íons adquirem carga neutra.

Pode-se resumir então que o processo eletrolítico (também chamado de 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 uma fonte de energia elétrica externa; um exemplo pode ser verificado na Figura 1.

Figura 1 – Eletrólise do cloreto de sódio fundido.



Fonte: SINOTI (2004).

A seguir serão apresentados conceitos obtidos através dos estudos de Faraday, físico e químico, considerado um dos cientistas mais influentes de todos os tempos, principalmente por suas contribuições para os fenômenos da eletricidade, da eletroquímica e do magnetismo.

A eletrólise possui eventos que podem ser condensados em duas leis de Faraday, surgidas em 1835 (DENARO, 1974; TICIANELLI, CAMARA e SANTOS, 2005), são elas:

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

As leis de Faraday podem ser usadas 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 à quantidade de coagulante entregue à solução (KERWICK *et al.*, 2005).

Dentre as várias técnicas de desinfecção já citadas anteriormente, esse TG tem encontrado bons resultados com o processo eletrolítico, o que reforça sua importância e valor de investimento para mais estudos e utilização real.

2.2 REATOR ELETROLÍTICO

O reator eletrolítico é um tipo de reator químico em que é feita a reação de eletrólise a fim de promover reações químicas do tipo eletrolíticas (FOGLER, 2011).

Um reator eletrolítico, em relação ao seu modo de operação, pode ser classificado como:

- Reator de batelada: reagentes são colocados dentro do reator, a reação ocorre e depois o produto é retirado do reator até que o mesmo seja esvaziado;
- Reator de fluxo contínuo: opera em curso estável e simultâneo com os reagentes entrando e o produto saindo com o mesmo fluxo ao longo do tempo;

- Reator de fluxo contínuo com agitação: semelhante ao reator de fluxo contínuo, porém com um agitador que torna a mistura homogênea, o que é indesejável no caso do tratamento de água já que se deseja alcançar a separação de água e resíduos.

Durante a operação de uma célula eletrolítica a queda de tensão não é distribuída uniformemente, e isso se dá pela resistência elétrica do eletrólito e dos 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 está diretamente relacionada ao desgaste do eletrodo (oxidação) 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. Sendo assim, a corrente medida por um multímetro durante um processo de eletrocoagulação é, a princípio, proporcional a quantidade do metal ionizado gerado em solução.

Ao se ter conhecimento a respeito da massa do eletrodo, e sabendo 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, assim como a área dos eletrodos que participará da eletrólise. Deste modo, por meio da corrente aplicada, é possível determinar a potência em KWh/m³ de um reator eletrolítico em fluxo contínuo de acordo com a equação (1) (FONSECA, 2017).

$$P = \frac{U \times i}{Q \times 100} \quad (1)$$

Onde:

P = Potência (kWh/m³)

U = Potencial (V)

i = Corrente aplicada na eletrólise (A)

Q = Vazão (m³/h)

Dada a finalidade do presente trabalho, adaptou-se a equação anterior para que fique em KWh/l, sendo então possível determinar, por meio da corrente aplicada, a potência de um reator

eletrolítico em fluxo contínuo tal como consta com a equação (2) de forma que seu resultado possibilite melhor visualização e compreensão.

$$P = \frac{U \times i}{Q \times 1000} \quad (2)$$

Onde:

P = Potência (kWh/l)

U = Potencial (V)

i = Corrente aplicada na eletrólise (A)

Q = Vazão (l/h)

2.3 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. Além das vantagens expostas anteriormente, existem também as seguintes:

- Utilização de equipamentos simples e de fácil operação (MOLLAH *et al.*, 2001);
- Remoção eficiente de substâncias que dão sabor, cor e odor na água (MOLLAH *et al.*, 2001);
- Tempos de detenção pequenos em relação a outros processos de desinfecção (MOLLAH *et al.*, 2001), como por exemplo, o tratamento por raios UV que necessitam de filtragem para se diminuir a turbidez do efluente e desencadeando em um significativo aumento do custo do processo de tratamento (GONÇALVES *et al.*, 2003).

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 (2004), em pesquisa com sistema eletrolítico, atribui aos mecanismos eletrofloculação (contendo também a eletrocoagulação e a eletroflotação) e geração de produtos oxidantes a eficiência de desinfecção e de características gerais de efluentes sanitários, tais processos serão melhor explicados ainda neste capítulo.

Bittencourt *et al.*, (2005) e Yee *et al.*, (2006) afirmaram que a geração de THM com uso do dispositivo eletrolítico é menor se comparada à cloração química, porém uma grande formação de íons cloreto foi observada por Yee *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.

Durante o processo eletrolítico os principais fenômenos eletroquímicos que ocorrem no tratamento de efluentes são a eletrólise do próprio efluente, a eletrofloculação (eletrocoagulação / eletroflotação) e a eletro-oxidação, explanados na sequência.

2.3.1 Eletrólise do efluente

Na eletrólise do efluente, a água é reduzida ao hidrogênio no cátodo e oxidada ao oxigênio no ânodo. Esses gases ajudam a flotar os poluentes presentes no ambiente de ação para a superfície.

2.3.2 Eletrofloculação (eletrocoagulação / eletroflotação)

O processo da eletrofloculação é um processo eletrolítico que envolve a desestabilização de poluentes emulsificados, ou em suspensão, em meio aquoso (NETO *et al.*, 2011). Tal processo é composto pela eletrocoagulação e pela eletroflotação:

- A eletrocoagulação envolve a geração de íons metálicos no ânodo enquanto que gás hidrogênio é liberado no catodo (CHEN, CHANG e HUNG, 2004). A coagulação ocorre quando os cátions do metal se combinam com as partículas negativas carregadas pelo ânodo em consequência do movimento eletroforético. Os contaminantes presentes na corrente de água residuária são tratados tanto por reações químicas e precipitação ou por 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). Para que o processo de eletrocoagulação seja eficiente deve-se ter o controle de vários parâmetros, como por exemplo:
 - Densidade da corrente e a tensão na célula;
 - Materiais, como a área específica e espaçamento dos eletrodos;

- Taxa de agitação ou vazão;
 - PH do efluente;
 - Temperatura;
 - Concentração de eletrólitos;
 - Tempo de permanência na célula;
 - Tamanho das partículas e concentração dos poluentes.
- A eletroflotação é um processo simples que flota os poluentes para a superfície por microbolhas de hidrogênio e oxigênio geradas pela eletrólise (CHEN, CHANG e HUNG, 2004).

2.3.3 Eletro-oxidação

Na eletro-oxidação, 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 ânodo e então destruídos pela reação de transferência de elétron anódica (RAJKUMAR e PALANIVELU, 2004). Os óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos 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 e PALANIVELU, 2004).

3 DESENVOLVIMENTO

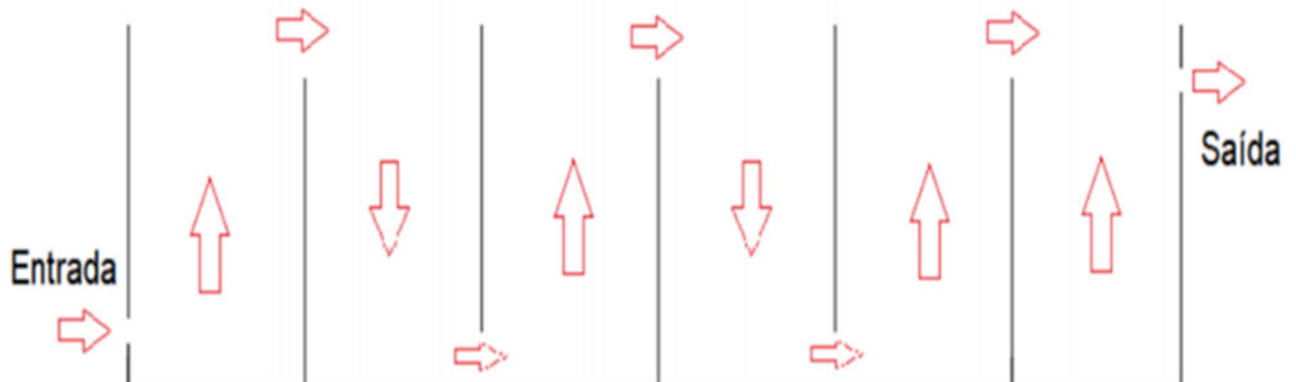
A seguir são expostos detalhes sobre o protótipo construído, testes realizados e dados obtidos na execução deste estudo de avaliação do processo de eletrólise para substituição da etapa de cloração no tratamento de água através do protótipo em questão, utilizando um tanque eletrolítico de escala reduzida com eletrodos de alumínio.

3.1 ESPECIFICAÇÕES DO PROTÓTIPO CONSTRUÍDO

A seguir são listadas as informações técnicas do protótipo construído em estudos realizados em uma empresa de tratamento de água de Taubaté-SP, tal protótipo foi fruto das pesquisas bibliográficas realizadas acima:

- A célula utilizada foi um protótipo de bancada desenvolvido para trabalhar em fluxo contínuo, como mostra a Figura 2;

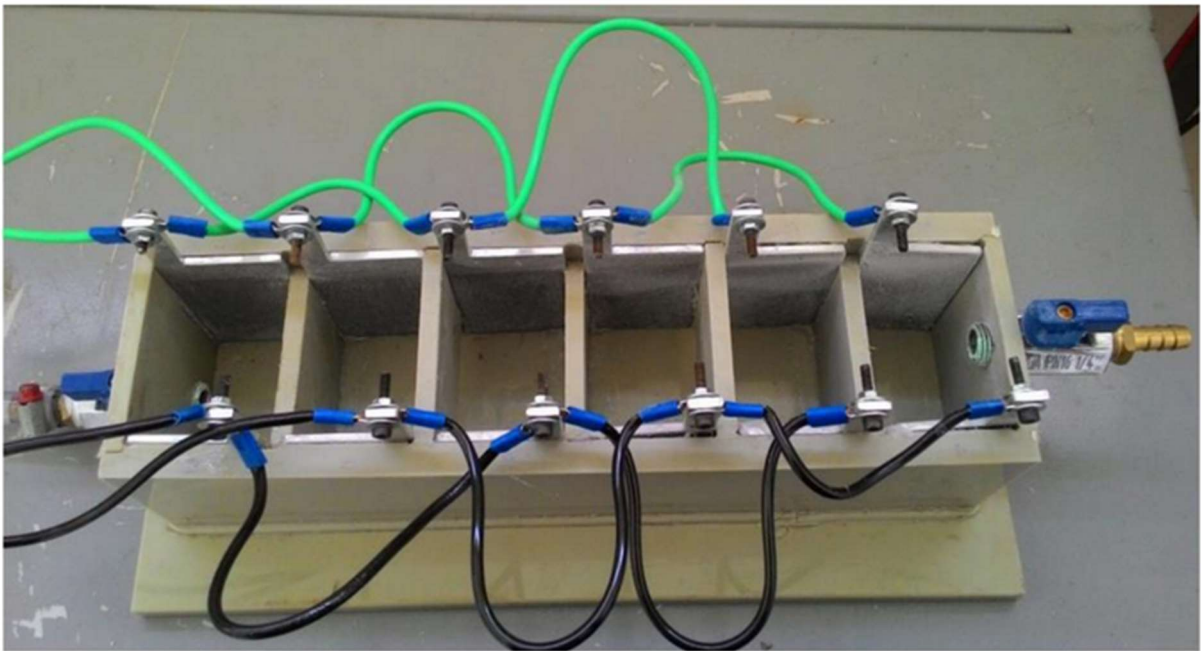
Figura 2 – Representação do fluxo do efluente (vista lateral do protótipo).



Fonte: Próprio Autor (2018).

- O protótipo foi confeccionado em polipropileno com dimensões de 28,6 x 6,3 x 6,5 cm e possui volume útil de 1l;
- Foi utilizado como eletrodos seis pares de placas de alumínio de dimensões 4,72 x 6,56 cm posicionados paralelamente, conforme apresentados na Figura 3;

Figura 3 – Protótipo desenvolvido.



Fonte: Próprio Autor (2018).

- O alumínio foi escolhido como eletrodo, pois, em pesquisas realizadas por Sinoti e Souza (2005), conclui-se que se trata da melhor opção tanto no que diz respeito ao custo financeiro, quanto aos processos de eletrocoagulação e eletrofloculação explanados no capítulo anterior;
- Para o controle da vazão fez-se uso de uma válvula agulha, possibilitando um controle preciso da entrada do efluente através da célula eletrolítica.

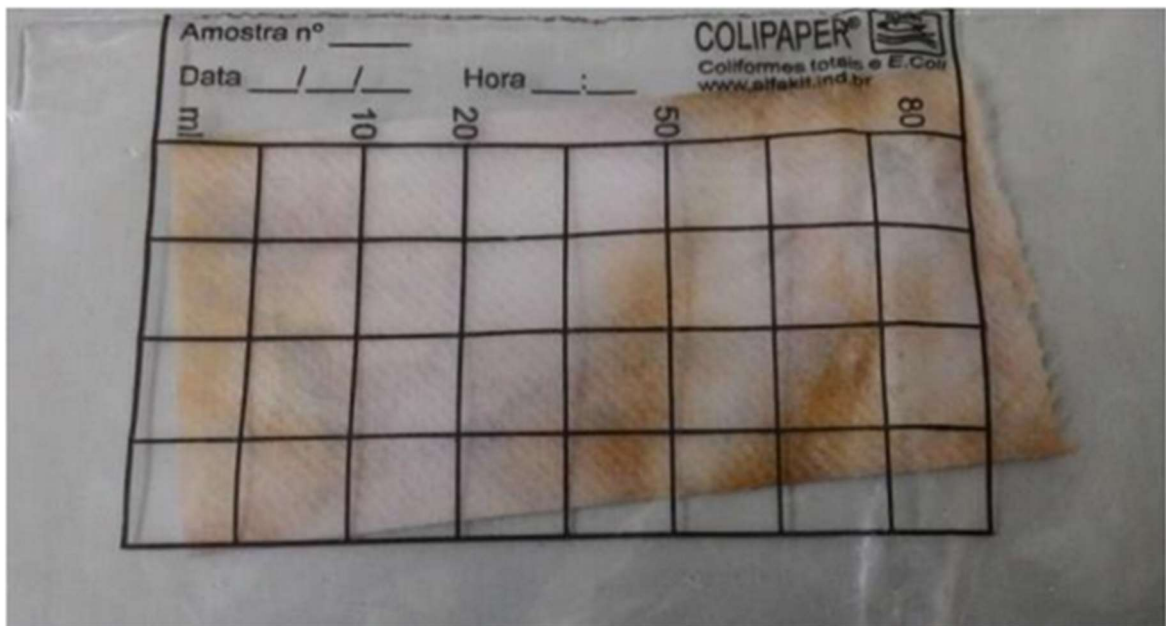
3.2 TESTES COM O PROTÓTIPO E DADOS OBTIDOS

Para melhor entendimento de como os procedimentos foram elaborados faz-se necessário saber o que é um retificador; trata-se de um dispositivo que permite que uma corrente alternada (ou tensão) seja constante ou transformada em uma corrente contínua.

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.

Foram escolhidos como parâmetros de teste: a corrente elétrica, a densidade de corrente, o tempo de detenção hídrica (TDH), a potência, a vazão e os coliformes totais, sendo estes últimos comparados a uma amostra de referência, conforme apresentada na Figura 4, através da lâmina do Colipaper, que é um material utilizado para analisar a água e os efluentes no que diz respeito à sua limpidez; a lâmina estava totalmente contaminada após a incubação na micro estufa.

Figura 4 – Amostra de referência após incubação.

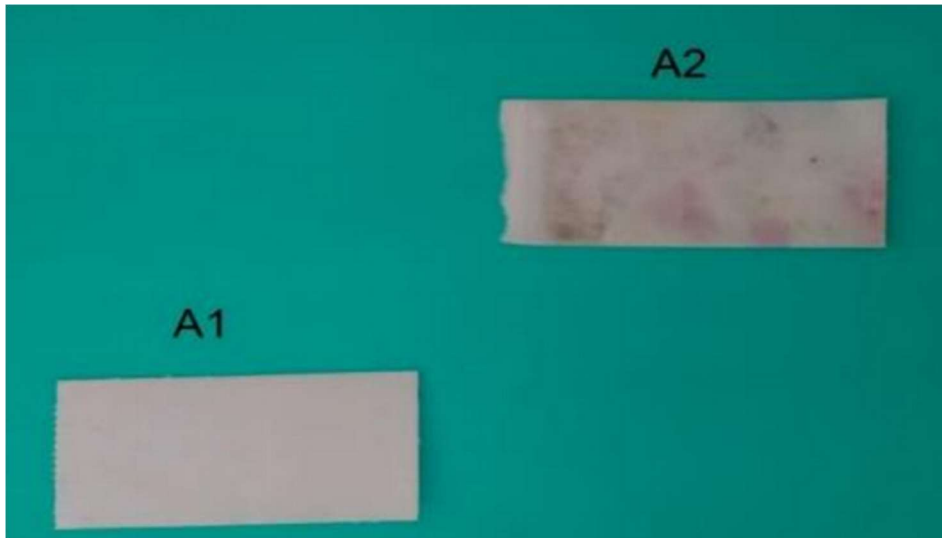


Fonte: Próprio Autor (2018).

Na sequência, 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 quatro voltas no volante da válvula, pois apresentou um TDH de 3min20s para o volume de 1l.

No primeiro teste foi usado o retificador em ponte com tensão contínua de aproximadamente 120V, medido por um multímetro na escala de voltagem, e foram coletadas duas amostras A1 e A2, como apresentado na Figura 5, sendo a amostra A2 coletada no 3º slot da célula, em contato com o material flotado, e o efluente somente passou por três pares de eletrodos.

Figura 5 – Amostras A1 e A2 após incubação.



Fonte: Próprio Autor (2018).

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 contínua de aproximadamente 60V, energizando os seis pares de eletrodos, amostra A3, e, na sequência, com os retificadores de meia onda e onda completa, mas energizando apenas três pares de eletrodos, amostras A4 e A5 respectivamente. E então, fez-se um último procedimento experimental, o qual teve uso do retificador de onda completa e três pares de eletrodos energizados, porém com três 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 6 e 7, foram coletadas no registro de saída da célula eletrolítica.

Figura 6 – Amostras A3 e A4 após incubação.



Fonte: Próprio Autor (2018).

Figura 7 – Amostras A5 e A6 após incubação.



Fonte: Próprio Autor (2018).

O cálculo da potência dos testes foi realizado de acordo com a equação (1), já exposta no capítulo anterior, porém com as devidas conversões de unidades para que o valor expresso seja dado em kWmin/l, conforme apresentado na equação (2).

A Tabela 1 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 1 – Valores dos parâmetros durante os testes.

AMOSTRA	RETIFICAÇÃO	VÁLVULA	PARES ELETRODOS	TENSÃO MÉDIA (V)	CORRENTE (A)	DENSIDADE DE CORRENTE (mA/cm ²)	TDH
Referência	-	-	-	-	-	-	-
1	Onda completa	4 voltas	6	120	5,8	36,19	5min46s
2	Onda completa	4 voltas	3	120	2,9	36,19	2min53s
3	Meia onda	4 voltas	6	60	2,68	16,73	7min42s
4	Meia onda	4 voltas	3	60	1,119	13,97	2min9s
5	Onda completa	4 voltas	3	120	2,23	27,84	2min
6	Onda completa	3 voltas	3	120	2,014	25,14	55s

Fonte: Próprio Autor (2018).

A Tabela 2 apresenta os valores da potência em kWmin/l e vazão em l/min dos testes.

Tabela 2 – Valores potência e vazão.

AMOSTRA	VAZÃO (l/min)	POTÊNCIA (kWmin/l)
Referência	-	-
1	0,173	4,02
2	0,346	1
3	0,129	1,24
4	0,465	0,144
5	0,5	0,535
6	1,09	0,221

Fonte: Próprio Autor (2018).

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 – Resultados dos testes de desinfecção.

AMOSTRA	COLIFORMES TOTAIS (UFC/100ml)
Referência	>>1600
1	0
2 (3º slot com espuma)	640
3	0
4	>>1600
5	0
6	1360

UFC = Unidade de Formação de Colônias

Fonte: Próprio Autor (2018).

4 RESULTADOS

Através do protótipo apresentado no capítulo anterior foi possível estudar a viabilidade de desinfecção de um efluente utilizando processo eletrolítico em fluxo contínuo, para atingir uma desinfecção mínima, que permita a utilização da água residuária em irrigação convencional, estendendo-se, inclusive, para condições de consumo humano e também na pecuária.

Conforme os resultados da amostra A2, que foi coletada no 3º slot da célula eletrolítica e apresentava espuma formada pelo processo de eletroflotação (a qual não foi retirada por completo), pôde-se concluir que mesmo o processo eletrolítico destruindo a membrana dos patógenos, o material flotado continha algumas bactérias que sobreviveram. Assim, era essencial impedir que esta espuma entrasse em contato com o efluente tratado, pois causaria a proliferação dos patógenos depois de certo tempo, podendo 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 do número permitido pela legislação, algo positivo, e diante disso concluiu-se que, para o retificador de onda completa com o nível de tensão contínua de 120V, não era necessário todos os pares de eletrodos estarem energizados durante o processo, ocorrência provada pelo resultado da amostra A5. Vale acrescentar que o mesmo não ocorreu com o retificador de meia onda, amostra A4, pois a corrente apresentada estava baixa em relação ao tempo de detenção.

Também ficou evidente que a variação do TDH entre os testes com quatro 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 uma potência maior na amostra A3, mesmo com o teste apresentando aproximadamente metade da tensão e corrente em relação ao teste da amostra A1.

A amostra A6, por ter dado três 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 os eletrodos estejam próximos, assim o efluente terá uma área de

contato maior com as placas, fazendo com que os efeitos da eletrofloculação sejam elevados e por consequência melhores para o caso.

Quanto à desinfecção do efluente os resultados foram extremamente satisfatórios, já que as amostras A1, A3 e A5, apresentaram 100% de desinfecção, e a proposta do TG é a desinfecção mínima segundo a legislação vigente.

5 CONCLUSÃO

Diante dos estudos bibliográficos e testes realizados através de um protótipo, conclui-se que o principal método de tratamento de água, composto pela sequência de: decantação, filtração, desinfecção com cloro e fluoretação; pode, de acordo com as condições estudadas, ter a etapa da desinfecção com uso de cloro substituída totalmente pelo uso da eletrólise conforme exposto neste TG.

Visa-se o uso da eletrólise da água, nas condições expostas, para fins: irrigatórios (agricultura), tendo obtido um alcance positivo de que o uso também poderá ser dos seres humanos (consumos diversos, inclusive ingestão) e na pecuária; atendendo às exigências sanitárias e se enquadrando na viabilidade financeira da estação de tratamento (se comparado aos demais tratamentos de desinfecção da água utilizados regularmente).

Ao empregar o uso de um tanque eletrolítico para substituir o processo de desinfecção da água com cloro as vantagens se estenderão inclusive para o meio ambiente, pois, conforme salientado previamente, há risco no transporte desta substância, considerada uma carga perigosa.

À vista do percurso realizado no TG, depreende-se, em síntese:

- O levantamento bibliográfico sobre a legislação quanto a desinfecção mínima para o uso de água tratada e a respeito da desinfecção por raios UV. Sendo, esta última, a fim de comparar qual método de desinfecção seria mais vantajoso escolher;
- Análise dos dados obtidos, os quais foram feitos com o intuito de ajudar a determinar o tempo mínimo de detenção na célula eletrolítica;
- Estudo e aplicação (através de um protótipo) de soluções elétricas e mecânicas para superar as limitações de variação da vazão que ocorrem no processo eletrolítico para fins de desinfecção de efluentes, que é o objeto de estudo deste TG.

Sendo assim, percebe-se que objetivo do presente trabalho foi alcançado pelo meio da avaliação e análise do processo de eletrólise, comprovando a eficácia na substituição da cloração no tratamento de água mediante ensaio em uma empresa de tratamento de água na

cidade de Taubaté-SP, a qual recebe efluentes, dispondo de um tanque eletrolítico de escala reduzida com eletrodos de alumínio; tendo sido obtido um sistema, ainda em fase amostral, que opera em fluxo contínuo de baixa vazão e que pode ser aplicado para fins: irrigatórios na agricultura, pecuários e de consumos diversos dos seres humanos; atendendo às exigências sanitárias, se enquadrando na viabilidade financeira da estação de tratamento de água e reduzindo riscos ambientais.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Diante de todos os pontos apresentados, 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;
- O estudo do nível de eficiência ao se aproximar eletrodos, aumentando assim sua área de contato com o efluente;
- Determinação do tempo de troca dos eletrodos;
- A execução em escala real do projeto, após atendidos os itens acima.

Em seguida têm-se as Figuras 8 e 9 que apresentam uma célula eletrolítica referente ao depósito de pedido de patente (MARCELINO, 2018), a ser construída para trabalhos futuros. A célula eletrolítica busca a desinfecção em fluxo contínuo permitindo o controle da desinfecção para variação de vazão e podendo ser utilizada para desinfecção mínima ou total de patógenos de efluentes em fluxo contínuo de vazão inconstante, sem o uso de produtos químicos:

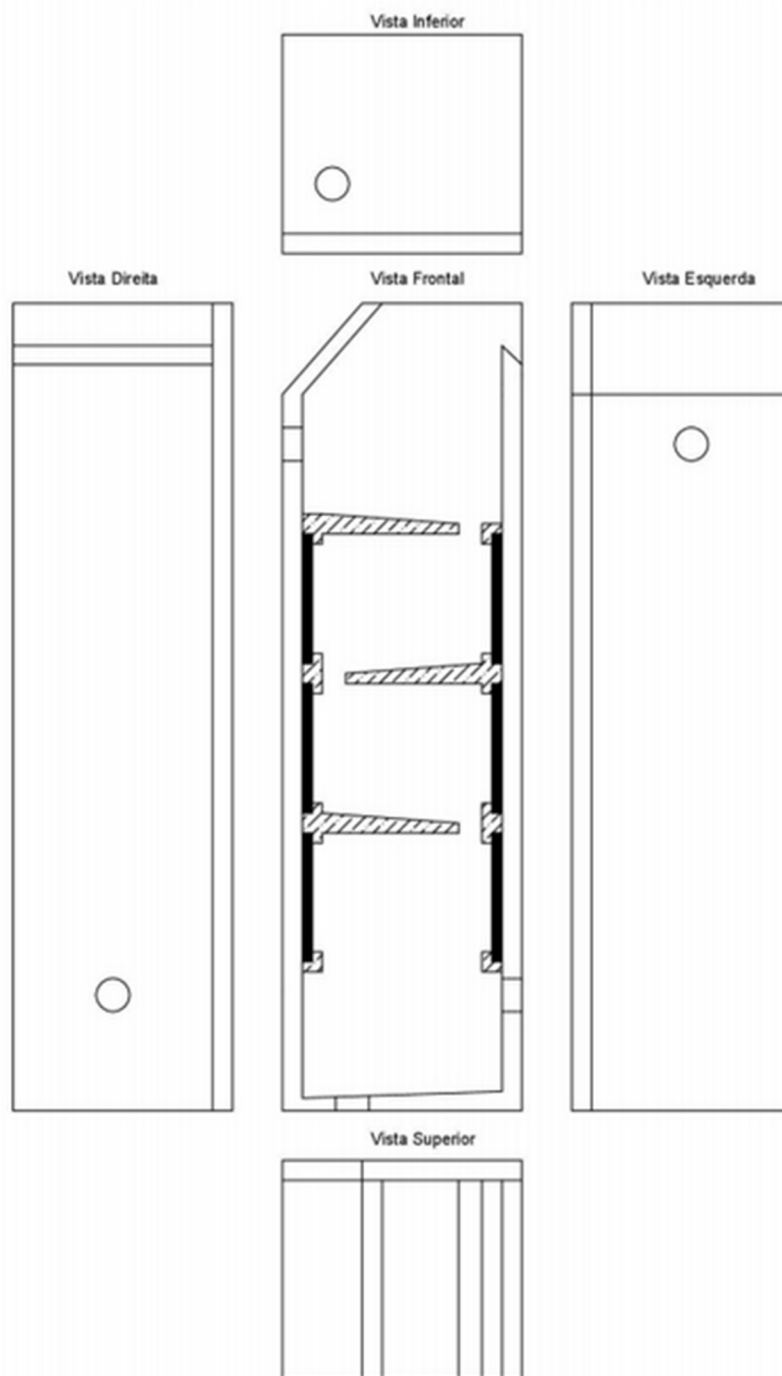
- No tratamento bruto de efluentes;
- No tratamento de efluentes de águas residuárias;
- Ou em diferentes fases no tratamento de água potável.

Esta célula eletrolítica apresenta:

- Opção de uma desinfecção mínima, reduzindo o tempo de detenção do efluente e, em consequência, a energia elétrica consumida no processo;

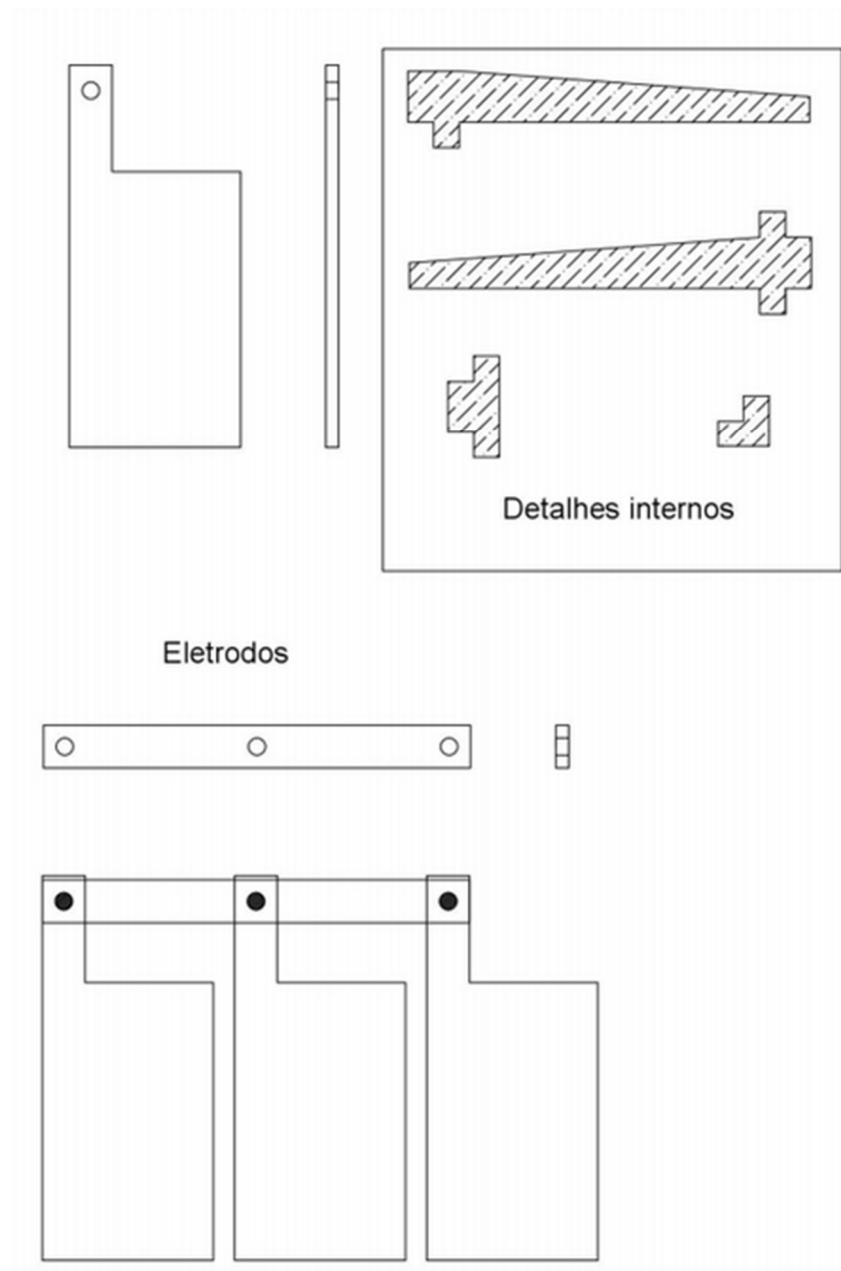
- Tampa frontal removível, permitindo fácil acesso aos eletrodos, com a possibilidade de troca das posições dos mesmos, positivo com o negativo e vice-versa, para que as respectivas superfícies sejam utilizadas de ambos os lados, antes da substituição definitiva dos mesmos.

Figura 8 – Célula eletrolítica.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 9 – Detalhes da célula eletrolítica.



Fonte: Próprio Autor.

REFERÊNCIAS

- BIDOIA, Ederio D.; TOLENTINO-BISNETO, Rodolfo. **Effects of the Eletrolytic Treatment on Bacillus Subtilis**. Brazilian Journal of Microbiology. Brazilian Congress of Microbiology, held in Florianopolis, SC, Brazil, v. 1, n. 34, p.48-40, nov./2003.
- BITTENCOURT, S. *et al.* **Aplicação de Lodos de Estações de Tratamento de Água e de Tratamento de Esgoto em Solo Degradado**. Eng Sanit Ambient, v. 17, n. 3, p. 315-324, nov./2012.
- CDC - Centers for Disease Control and Prevention. **Water Treatment**. Disponível em: https://www.cdc.gov/healthywater/drinking/public/water_treatment.html. Acesso em: 28 set. 2020.
- CHEN, J. P.; CHANG, S-Y.; HUNG, Y-T. **Electrolysis**. *In*: WANG L. K.; HUNG Y-T.; SHAMMAS N. K. Physicochemical Treatment Processes. Humana Press, Chapter 10, p. 359-378. (Handbook of Environmental Engineering, v. 3), 2004.
- CLUGG, David. **Improving the Safety of Chlorine Transporting**. CEW: Features, India, p. 86-87, abr./2012.
- DENARO, A. R. **Fundamentos de Eletroquímica**. 01. ed. Câmara Brasileira do Livro, São Paulo - SP: Editora Edgard Blucher LTDA - Ed. da Universidade de São Paulo, p. 88, 1974.
- DESPIC, J. O. B. A. R. **Electrochemical reaction**. Encyclopaedia Britannica, Inc., p. 01-18, dez./2011. Disponível em: URL: <https://www.britannica.com/science/electrochemical-reaction>. Acesso em: 17 set. 2020.
- FOGLER, H. Scott. **Essentials of Chemical Reaction Engineering: Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences**. Boston, MA 02115: Pearson Education International, p. 746, 2010.
- FONSECA, A. A. **Tratamento de Esgotos por Processo Biológico Aeróbio Eletroquimicamente Assistido**. 155p. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, DF. 2017.

GONÇALVES, R. F. *et al.* **Desinfecção por radiação ultravioleta.** *In:* Desinfecção de efluentes sanitários, PROSAB 3, ABES-RJ, RIMA, São Carlos, p.209-275, 2003.

GRIMSHAW, James. **Electrochemical Reactions and Mechanisms in Organic Chemistry.** School of Chemistry, The Queen's University of Belfast. Elsevier B.V., p. 404, 2000.

KERWICK, M. *et al.* **A methodology for the evaluation of disinfection technologies.** Journal Water Health, v.3, n.4, p.393-404, 2005.

MARCELINO, Marcio Abud. **Relatório do Sistema de Desinfecção por Processo Eletrolítico da Aratú Ambiental LTDA.** p. 01 - 04, jun./2016.

MOLLAH, M. Y. A. *et al.* **Electrocoagulation (EC) - Science and Applications.** Journal of Hazardous Materials, Gill Chair of Chemistry & Chemical Engineering, Lamar University, Beaumont, TX 77710, USA, n. 84, p. 29-41, dez./2001.

MOLLAH, M. Y. A. *et al.* **Fundamentals, Present and Future Perspectives of Electrocoagulation.** Journal of Hazardous Materials, Institute Technology of Saltillo, Department of Metallurgy and Materials Science V, Caranza 2400, Saltillo Coah, Mexico C.P. 25000, Mexico, n. 114, p. 199-210, ago./2004.

NETO, S. D. A. *et al.* **Tratamento de Resíduos de Corante por Eletrofloculação: Um Experimento para Cursos de Graduação em Química.** Química Para um Mundo Melhor: International Year of Chemistry, Departamento de Química, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Av. Bandeirantes, 3900, 14049-901, Ribeirão Preto - SP, Brasil, v. 34, n. 8, p. 1468-1471, mai./2011.

RAJKUMAR, D.; PALANIVELU, K. **Electrochemical Treatment of Industrial Wastewater.** Journal of Hazardous Materials. Centre for Environmental Studies, Anna University, Chennai 600 025, India, n. 113, p. 123-129, fev./2004.

SALLES, Carlos Afonso. **Desinfecção Eletrolítica de Efluente Sanitário em Fluxo Contínuo.** Centro de Ciências Exatas e Tecnologia: Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, p. 130, dez./2008.

SINOTI, A. L. L. **Processo eletrolítico no tratamento de esgotos sanitários: Estudo da sua aplicabilidade e mecanismos associados.** Dissertação de Mestrado, Publicação PTARH.DM

- 12 / 04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, p. 143, 2004.

SINOTI, A. L. L.; SOUZA, M. A. A. de. **Processo eletrolítico no tratamento de esgotos sanitários**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, II-047, Campo Grande/MS, 2005.

TICIANELLI, Edson A.; CAMARA, Giuseppe A.; SANTOS, L. G. R. A. **Eletrocatalise das Reações de Oxidação de Hidrogênio e de Redução de Oxigênio**. Química Nova: Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, CP 780, 13560-970, São Carlos - SP, v. 28, n. 4, p. 664-669, mai./2005.

UNICEF. **Progress on Drinking Water Sanitation and Hygiene**. Disponível em: <https://www.unicef.org/reports/progress-on-drinking-water-sanitation-and-hygiene-2019>. Acesso em: 28 set. 2020.

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

YEE, L. F. *et al.* **Dissolved Organic Matter and its Impacts on the Chlorine Demand of Treated Water**. The Malaysian Journal of Analytical Sciences. University Kebangsaan Malaysia, v. 10, n. 2, p. 243-250, dez./2006.