

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Instituto de Química



**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
ELETROCOAGULAÇÃO PARA REMOÇÃO DE MATÉRIA
COLOIDAL DE EFLUENTE REAL PROCEDENTE DE ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ÁGUA INDUSTRIAL**

VANINE VANILA SILVA DE BARROS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Orientador: José Joaquim Linares Leon

Brasília, 10 de dezembro de 2015

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE
ELETROCOAGULAÇÃO PARA REMOÇÃO DE MATÉRIA
COLOIDAL DE EFLUENTE REAL PROCEDENTE DE ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ÁGUA INDUSTRIAL**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado como parte das atividades
para obtenção do título de bacharel do
curso de Química Tecnológica da
Universidade de Brasília

Prof. orientador: José Joaquim Linares Leon

Brasília, 2015

*Dedico este trabalho aos meus pais
Demetrius e Maria Aparecida e as
minhas irmãs Larissa e Viviane pelo
apoio, incentivo, amor e otimismo
incondicional em todos os momentos.
Por tudo...*

“O único dia fácil foi ontem!”

*Filosofia dos Seal da Marinha dos
Estados Unidos*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, pois sem ele eu não teria forças para concluir mais uma etapa da minha vida, por renovar a cada momento a minha coragem e disposição e pelo discernimento concedido ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, Demetrius e Maria Aparecida, minha irmã Larissa e toda minha família que sempre me apoiaram, obrigada por sua capacidade de acreditar e investir em mim, pois foi seu cuidado e dedicação que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir e a certeza de que não estou sozinha nessa caminhada.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Professor Dr. José Joaquin Linares Leon, que acreditou em mim, que ouviu pacientemente todas as minhas considerações compartilhando comigo as suas ideias, conhecimentos e experiências científicas, que com sabedoria soube guiar-me os passos e os pensamentos para o alcance de meus objetivos, pela sua disponibilidade, seu entusiasmo e sua paixão pela profissão e principalmente pela paciência. Quero expressar o meu reconhecimento e admiração pela sua competência profissional e minha gratidão pela sua amizade, por ser um profissional extremamente qualificado e pela forma humana que conduziu minha orientação que me motivou cada vez mais a concluir esse trabalho.

Ao professor Dr. Marcelo Moreira pelo acesso ao laboratório e aos equipamentos e acima de tudo pela confiança.

Ao grupo de alunos que também são orientados do meu orientador e que compartilharam momentos inesquecíveis dentro do laboratório ao meu lado, obrigada por estarem sempre dispostos a me ajudar e esclarecerem minhas dúvidas.

Aos meus colegas e amigos da UnB, obrigada acima de tudo pela amizade, por toda ajuda, força e compreensão de todos os dias, pelas alegrias e tristezas compartilhadas, um abraço especial ao Aurélio, Larissa Bianca, Brenda, Carol, Marysol e Érika. E a minha eterna amiga Viviane, que mesmo não fazendo parte dessa universidade esteve presente em muitos momentos.

Enfim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho, o meu mais sincero muito obrigada.

RESUMO

A crescente preocupação das empresas com o seu aumento na geração de resíduos, faz com que a busca por tratamentos alternativos com menores custos e mais eficazes para a remoção de contaminantes também cresçam, visto que as mesmas estão sujeitas a multas e processos legais caso não cumpram as normas exigidas por órgãos responsáveis para a liberação de efluentes industriais no meio ambiente.

O trabalho realizado apresenta uma projeção de sistema de eletrocoagulação com seus equipamentos e montagem do processo proposto como alternativa para tratamento de efluente industrial resultante de uma indústria farmacocômica, além de discutir resultados de coagulação química (usando sais de ferro e de alumínio) e compará-los com os correspondentes à eletrocoagulação usando eletrodos metálicos concomitantes ao agente coagulante. Com isto, pretende-se, primeiro, determinar as condições mais adequadas para eletrocoagulação e comparar os resultados obtidos pelas duas tecnologias.

No processo de coagulação química é observada uma boa eficiência na remoção de matéria coloidal do efluente tratado, tanto em termos de turbidez com a remoção de mais de 90% como de demanda química de oxigênio (DQO) com a remoção maior que 60% da matéria presente no efluente para a mesma dosagem de ambos os coagulantes químicos testados – 90 ppm, ainda assim o sulfato de alumínio apresentou uma eficácia ligeiramente menor que o coagulante de cloreto de ferro. Na eletrocoagulação foi observada uma remoção bastante eficiente de ambos os eletrodos, apesar do eletrodo de ferro apresentar uma vantagem frente ao alumínio devido ao seu menor tempo de operação com uma remoção de 88% de turbidez em 10 minutos de processamento, em quanto o alumínio para a mesma remoção levaria um tempo mais prolongado de operação do sistema que seria maior que 80 minutos. Além disso, o processo tem como outra vantagem de não requerer correção do pH do efluente, além de uma diminuição da condutividade, já que não há adição extra de sais em solução devido a sua geração *in situ*. Com isso a eletrocoagulação com eletrodos de ferro torna-se um processo vantajoso frente à coagulação química para tratamento de um efluente industrial de origem farmacêutica.

Finalmente são apresentados cálculos preliminares simples para montagem de uma estação de tratamento de efluentes por esta tecnologia.

Palavras Chaves: Efluente industrial, Coagulação Química, Eletrocoagulação.

ABSTRACT

The growing business concern with its increase in waste generation, makes the search for alternative treatments with lower costs and more effective for removing contaminants also grow, as they are subject to fines and lawsuits if they meet not the standards required by agencies responsible for the release of industrial effluents into the environment.

The work presents a projection system electrocoagulation with their fittings as an alternative to the proposed process for treating industrial waste resulting of Pharmacology an industry, in addition to discussing chemical coagulation results (using iron salts and aluminum) and comparable them with the corresponding electrocoagulation using concomitant metal electrodes to the coagulant agent. With this, it is intended, first, to determine the most suitable conditions for electrocoagulation and compare the results obtained by the two technologies.

In the chemical process of coagulation is observed a good efficiency in removing colloidal treated effluent material, both in terms of turbidity of removal of over 90% as chemical oxygen demand (COD) with a higher removal than 60% of the raw present in the effluent for the same dosage of both chemical coagulants tested, yet the aluminum sulphate had slightly less efficacy that the coagulant of iron chloride. In electrocoagulation it was observed a very efficient removal of both electrodes, despite the iron electrode present an advantage over aluminum due to its lower operating time with a removal of 88% of turbidity within 10 minutes of processing, at as aluminum the same removal would take a longer time of operation of the system would be greater than 80 minutes. Moreover, the process has the further advantage of not requiring the effluent pH correction, plus a reduction in conductivity, since no extra addition of salts in solution due to its in situ generation. With this electrocoagulation with iron electrodes becomes advantageously opposite the chemical coagulation process for treating an industrial wastewater pharmaceutical origin.

Finally appear simple preliminary calculations for mounting a sewage treatment plant for this technology.

Key words: industrial effluent, coagulation chemistry, electrocoagulation.

Lista de figuras

Figura 1 – Esquema representativo dos processos de tratamento de efluentes.

Figura 2 – Esquema representativo da desestabilização das partículas coloidais no seio da solução.

Figura 3 – Mecanismos de atuação da coagulação química.

Figura 4 – Etapas do processo de coagulação / floculação.

Figura 5 – Mecanismos de atuação da eletrocoagulação.

Figura 6 – Fluxograma da metodologia utilizada

Figura 7 – Esquema representativo do sistema implementado para realizar os ensaios de coagulação química.

Figura 8 – a) Imagem de uma placa de acrílico com o eletrodo de alumínio aderido e, b) Reator ensamblado para eletrocoagulação.

Figura 9 – Instalação experimental do processo de eletrocoagulação.

Figura 10 – Imagem do efluente bruto utilizado no presente trabalho.

Figura 11 – Evolução da turbidez com a dose de sulfato de alumínio para os diferentes pH iniciais.

Figura 12 – Evolução da condutividade com a dose de sulfato de alumínio para os diferentes pH iniciais.

Figura 13 – Evolução da DQO com a dose de sulfato de alumínio para os diferentes pH iniciais.

Figura 14 – Sequência operativa de coagulação química com sulfato de alumínio em pH 4.

Figura 15 – Sequência operativa de coagulação química com sulfato de alumínio em pH 7.

Figura 16 – Sequência operativa de coagulação química com sulfato de alumínio em pH 10.

Figura 17 – Sequência operativa de coagulação química com sulfato de alumínio em pH 12.

Figura 18 – Evolução da turbidez com a dose de cloreto de ferro para os diferentes pH iniciais.

Figura 19 – Evolução da condutividade com a dose de cloreto de ferro para os diferentes pH iniciais.

Figura 20 – Evolução da DQO com a dose de cloreto de ferro para os diferentes pH iniciais.

Figura 21 – Sequência operativa de coagulação química com cloreto de ferro em pH 4.

Figura 22 – Sequência operativa de coagulação química com cloreto de ferro em pH 7.

Figura 23 – Sequência operativa de coagulação química com cloreto de ferro em pH 10.

Figura 24 – Sequência operativa de coagulação química com cloreto de ferro em pH 12.

Figura 25 – Evolução da turbidez durante o processo de eletrocoagulação com eletrodos de ferro (densidade de corrente de $2 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$).

Figura 26 – Sequência operativa de eletrocoagulação com eletrodo de ferro.

Figura 27 – Evolução da condutividade durante o processo de eletrocoagulação com eletrodos de ferro.

Figura 28 – Evolução do pH durante o processo de eletrocoagulação com eletrodos de ferro.

Figura 29 – Evolução da turbidez durante o processo de eletrocoagulação com eletrodos de alumínio (densidade de corrente de $5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$).

Figura 30 – Evolução da condutividade durante o processo de eletrocoagulação com eletrodos de alumínio.

Figura 31 – Evolução do pH durante o processo de eletrocoagulação com eletrodos de alumínio.

Figura 32 – Sequência operativa de eletrocoagulação com eletrodo de alumínio.

Figura 33 – Esquema representativo de uma instalação de eletrocoagulação.

Lista de Tabelas

Tabela 4.1. Produtos utilizados nos processos de coagulação e eletrocoagulação.

Tabela 5.1. Parâmetros físicos químicos do efluente bruto.

Lista de abreviaturas e siglas

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

NBR – Norma Brasileira.

ABNT – Associação Brasileira de Normas e Técnicas.

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto.

ETA – Estação de Tratamento de Água.

P.A. – Padrão Analítico.

DQO – Demanda Química do oxigênio.

COT – Carbono Orgânico Total.

pH – Potencial de Hidrogênio.

ASTM – American Society for Testing and Materials.

NTU – Unidades nefelométricas de turbidez.

ppm – partes por milhão.

Epóxi – Polímero Poliepóxido.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	14
3. REVISÃO DA LITERATURA	15
4. MATERIAL E MÉTODOS	26
4.1 PRODUTOS UTILIZADOS	26
4.2 INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS	27
4.2.1. Sistema de coagulação química	27
4.2.2. Sistema de eletrocoagulação	28
4.3 PROCEDIMENTOS OPERATIVOS	30
4.3.1 Caracterização do efluente de partida	30
4.3.2. Ensaio de coagulação química	30
4.3.3. Sistema de eletrocoagulação	31
4.4 TÉCNICAS ANALÍTICAS	31
4.4.1 Determinação de Demanda Química de Oxigênio (DQO)	31
4.4.2. Determinação de Turbidez, Condutividade e pH	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1. Caracterização do efluente de partida	33
5.2. Coagulação Química	34
5.3. Eletrocoagulação	42
5.3.1 Eletrocoagulação com eletrodos de Ferro	42
5.3.2 Eletrocoagulação com eletrodos de Alumínio	45
5.4. Proposta de Planta de Eletrocoagulação	48
6. CONCLUSÃO	50
7. RECOMENDAÇÕES	52
8. REFERÊNCIAS	53

1. INTRODUÇÃO

No decorrer da minha vida acadêmica e nas experiências em que estive realizando pesquisas dentro do laboratório, pude perceber uma dificuldade recorrente na disposição de resíduos produzidos durante vários processos, que causam certa preocupação em relação a destinação final desses compostos que podem ser prejudiciais ao meio ambiente e aos seres vivos que serão expostos.

Ao longo do meu curso de bacharel em Química Tecnológica em particular nos anos finais me deparei com disciplinas relacionadas a Química Verde que muito discorriam sobre as teorias e os métodos de tratamento e disposição de resíduos, mesmo sabendo que esse é um assunto fundamental a ser discutido durante a formação de químicos, essas disciplinas não possuem destaque em nossa graduação.

Quando pude entrar em contato com efluentes reais de indústrias e os processos de tratamento que elas realizavam para melhorar a qualidade dos mesmos, e coloca-los em níveis aceitáveis pelas normas estabelecidas dos órgãos regulamentadores responsáveis pela disposição de resíduos, a partir dessas informações que pude perceber a problemática enfrentada por essas empresas com relação ao custo-benefício dos tratamentos pude notar também que existem várias formas de otimizar esses processos, ou até mesmo, propor sistemas mais eficazes avaliando o tipo de resíduo que será eliminado.

Muito se discute sobre métodos de tratamento de resíduos e, algumas mudanças até têm sido feitas nesses processos, mas é preciso entender que os procedimentos de fato dependem de uma avaliação prévia do tipo de resíduo, ou seja, que compostos nele estão contidos, seu grau de toxicidade e o grau de pureza que se deseja alcançar. Fazem parte desse processo também a avaliação dos custos que a indústria terá com esses procedimentos e quais desses são mais eficazes para o resultado almejado.

Mudar os métodos de tratamento usados atualmente não é algo trivial dada a consolidação e aceitação dos mesmos que infelizmente baseiam em sua maioria pelo custo fornecido pela empresa, e não objetiva uma responsabilidade ambiental. Na verdade a disposição de resíduos deve fazer parte do processo de produção de todas as indústrias a qual o mesmo se aplica, e não ser vista com a finalidade de se cumprir regras que estão sujeitas a muitas caso ocorra o desrespeito das mesmas, que infelizmente é o que vem acontecendo.

Os processos de coagulação química têm sido amplamente utilizados como tratamento físico-químico nos processos de remoção de matéria coloidal baseados em diferentes mecanismos, tais como a neutralização de cargas ou o arraste após imersão dos coloides dentro dos flocos formados pelo coagulante. Geralmente este tratamento é aplicado com sucesso nas estações de tratamento de esgoto e em estações de tratamento de água residual industrial.

Desta forma, o presente trabalho aborda a possibilidade de tratar um efluente industrial de origem farmacêutica mediante processos de coagulação e, como alternativa, a utilização da eletrocoagulação química. Estudando a influência de parâmetros operativos como a dosagem de coagulante e o pH, assim como o tipo de coagulante utilizado (cloreto férrico e sulfato de alumínio) quando relacionados ao processo de coagulação.

Por outro lado, estuda-se também a alternativa de remoção de matéria coloidal por eletrocoagulação mediante o uso de eletrodos de alumínio e de ferro, sendo avaliada a remoção de turbidez e a matéria orgânica, além da condutividade e o pH das amostras durante o tratamento, junto com outros compostos de interesse na avaliação da qualidade das águas.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho de conclusão de curso é o projeto de um sistema de eletrocoagulação que inclua o reator e os sistemas auxiliares necessários para remoção da matéria coloidal presente em efluentes industriais. Para atingir a meta, será necessário definir os seguintes objetivos parciais:

- a) Realização de ensaios de coagulação química sob diferentes pH para determinar a dose ótima de coagulante, tanto para o ferro quanto para o alumínio.
- b) Ensaios de eletrocoagulação nas condições pré-definidas pelos ensaios de coagulação química usando eletrodos de ferro e alumínio metálico.
- c) Pré-projeto de um sistema de eletrocoagulação para tratamento de efluente industrial.

Todos estes ensaios foram realizados visando a maior remoção possível de turbidez e demanda química de oxigênio do efluente correspondente.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Toda atividade humana, inclusive as de caráter industrial, têm consequências negativas e dentre as mais preocupantes, estão os danos ambientais. Há algumas décadas, a geração de poluentes pelas empresas era entendida como uma consequência inevitável nos processos industriais, o que provocou um preocupante aumento no grau de poluição ambiental em muitas regiões do mundo. ^[6]

Com o grande desenvolvimento das indústrias dos mais diversos segmentos na sociedade, como por exemplo, as indústrias alimentícias, farmacêuticas, têxteis, automobilísticas, petrolíferas, e etc. vêm também o aumento da geração de resíduos e, conseqüentemente, um problema que precisa de soluções rápidas, limpas nos sentidos ambiental e economicamente viáveis. ^[11]

Produzidos em todos os estágios das atividades humanas, os resíduos, em termos tanto de composição, como de volume, variam em função das práticas de consumo e de produção. Neles podem estar inclusos produtos químicos, metais e/ou solventes que ameaçam os ciclos naturais onde são despejados, causando uma maior preocupação para as repercussões que podem ter sobre a saúde humana e sobre o meio ambiente. Os resíduos perigosos, produzidos, sobretudo pela indústria, são particularmente preocupantes, pois, quando incorretamente gerenciados, tornam-se uma grave ameaça ao meio ambiente. ^{[8] [10]}

Os resíduos podem ser classificados de diversas maneiras quanto as suas características físicas (seco ou molhado), químicas (orgânico ou inorgânico), sua origem (domiciliar, hospitalar, industrial, comercial, agrícola, e outros) e periculosidade (inertes, não inertes e perigosos). ^[1]

Para tratar a questão dos resíduos industriais, o Brasil possui legislação e normas específicas. Pode-se citar a Constituição Brasileira em seu Artigo 225, que dispõe sobre a proteção ao meio ambiente; a Lei 6.938/81, que estabelece a Política Nacional de Meio Ambiente; a Lei 6.803/80, que dispõe sobre as diretrizes básicas para o zoneamento industrial em áreas críticas de poluição; as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA 257, 263 e 258, que dispõem respectivamente sobre pilhas, baterias e pneumáticos e, além disso, a questão é amplamente tratada nos Capítulos 19, 20 e 21 da Agenda 21 (Rio-92).

A destinação, tratamento e disposição final de resíduos devem seguir a Norma 10.004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas que classifica os resíduos conforme as reações que produzem quando são colocados no solo e para a disposição de efluentes apresenta-se a Norma 9800 da mesma associação. ^[1]

De acordo com a Norma Brasileira — NBR 9800/1987, um **efluente líquido industrial é caracterizado como um despejo líquido proveniente do estabelecimento industrial, compreendendo emanções de processo industrial, água de refrigeração poluída, águas pluviais poluídas e esgoto doméstico.** ^[2]

Ainda assim nessa NBR, a mesma preconiza algumas proibições para o lançamento no sistema coletor público de esgoto sanitário que engloba alguns tipos de substâncias que, por si ou por interação com outros materiais possam vir a causar prejuízo público, risco à vida ou prejudiquem a operação e manutenção dos sistemas de esgotos. ^[2]

“Os valores limites desses parâmetros básicos dos efluentes líquidos industriais para serem lançados no sistema coletor público de esgoto sanitário, dotado ou não de tratamento, devem obedecer ao disposto nas legislações federal, estadual e municipal em vigor, tendo em vista a compatibilização desses efluentes com as características do sistema coletor e/ou do corpo receptor.” ^[2]

No Brasil a maioria dos esgotos é lançada em corpos d’água sem qualquer tratamento; entre eles estão os esgotos domésticos e os esgotos industriais.

Cabe aqui ressaltar, a diferença entre as Estações de Tratamento de Água (ETA) e as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), sendo a ETA uma estação que leva em consideração o tratamento de água pluvial e fluvial contaminada para o abastecimento de água potável para o consumo humano, e a segunda estação consiste em um tratamento do esgoto doméstico e/ou industrial separando-o do lodo contaminado e deixando o efluente com características amenas e de acordo com as legislações vigentes para ser disposto ao meio ambiente novamente. ^{[27][28]}

Observando esse comportamento que causa preocupação para com a degradação do meio ambiente e principalmente a contaminação das águas, um recurso natural muito importante para o Brasil, que se gerou a necessidade de um sistema mais rigoroso para o controle e fiscalização do tratamento desses efluentes, com isso a CONAMA criou uma

resolução específica para tal finalidade em que as empresas deveriam seguir suas normas antes de lançar esses resíduos gerados no meio ambiente sujeito a punições equivalentes caso ocorresse violação das mesmas, nessa Resolução a CONAMA se preocupa em definir conceitos, estabelecer parâmetros específicos para o lançamento dos efluentes e práticas de gestão para redução da geração e melhoria na qualidade dos mesmos. ^[3]

No artigo primeiro da Resolução criada em 2005 e alterada em 2011, tem como parágrafo único que diz:

“O lançamento indireto de efluentes no corpo receptor deverá observar o disposto nesta Resolução quando verificada a inexistência de legislação ou normas específicas, disposições do órgão ambiental competente, bem como diretrizes da operadora dos sistemas de coleta e tratamento de esgoto sanitário.” ^[3]

Ainda citando a Resolução, é de grande importância colocar o terceiro artigo que informa, ou contrário da NBR, que é estritamente necessário que o efluente tenha algum tipo de tratamento eficiente para a sua disposição. ^[3]

“Os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis.” ^[3]

Tendo a necessidade de se cumprir essas normas e alcançar uma maior conscientização ambiental, alguns processos de tratamento de efluentes podem ser elucidados para melhor compreensão e obtenção desses parâmetros exigidos, mas para isso deve se primeiramente caracterizar o tipo de efluente industrial em questão para que se aplique um tipo de tratamento mais eficaz e menos dispendioso para a empresa, visando evitar danos ambientais, prejuízos para a imagem da indústria frente à sociedade e atingir as demandas legais. ^{[7][9][10]}

O conhecimento da composição do efluente industrial possibilita a determinação do tipo de contaminação, o que é fundamental para definir o tipo de tratamento adequado, avaliar o enquadramento na legislação ambiental e estimar a capacidade de autodepuração do corpo receptor. ^[9]

As características físicas, químicas e biológicas do efluente industrial são variáveis com o tipo de indústria, com o período de operação, com a matéria-prima utilizada, com a reutilização de água e outros aspectos. Entre as determinações mais comuns para caracterizar o efluente estão as determinações físicas (temperatura, turbidez e condutividade), as químicas (pH, teor de matéria orgânica, presença/ausência de metais) e as biológicas (presença/ausência de seres patogênicos).^{[5][9]}

Assim como o efluente pode ser caracterizado de acordo com as suas propriedades físicas, químicas ou biológicas, os processos de tratamento que serão utilizados também são classificados de acordo com esses mesmos princípios, observando que não é utilizado apenas um tipo de tratamento, mas na maioria das vezes vários em conjunto. ^[5] A Figura 1 apresenta um esquema representativo de alguns exemplos que podem ser utilizados para o processo de tratamentos para efluentes.



Figura 1. Esquema representativo dos processos de tratamento.

O sistema de tratamento de efluentes não é classificado apenas pelas suas características, mas por níveis de atuação, sendo eles: tratamento preliminar, tratamento primário, secundário e terciário. ^[5]

O tratamento preliminar tem por objetivo a remoção de sólidos grosseiros, com o uso de peneiras para a finalidade de evitar a abrasão e a obstrução das tubulações, além de facilitar o escoamento do líquido. ^[5]

O tratamento primário visa a remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis, materiais flutuantes e parte da matéria orgânica em suspensão, com a utilização de decantação, flotação ou floculação para que se obtenha uma clarificação de alta eficiência. ^[5]

O tratamento secundário ocorre para que se alcance uma remoção de matéria orgânica dissolvida e da matéria orgânica em suspensão não removida no tratamento primário com a participação de microrganismos, podendo se utilizar processos aeróbios ou anaeróbios, como por exemplo, o uso de lodo ativado ou lagoas de estabilização. [5]

E por último tem-se o tratamento terciário que consiste no vários tipos de tratamento químico que são realizados nos efluentes como a precipitação química, coagulação química e/ou processos oxidativos. [5]

O processo coagulação/floculação é considerado um tipo de tratamento terciário de efluentes, pois emprega técnicas físico-químicas para a remoção de poluentes específicos.

A coagulação química é uma técnica que consiste na adição de coagulantes químicos com o intuito de causar a desestabilização das partículas coloidais - partículas sólidas de diâmetro entre 1 nm e 1000 nm, por adsorção ou neutralização de cargas, que eliminam a carga eletrostática negativa da superfície das partículas, uma vez que o coagulante químico está carregado positivamente, o que diminui a repulsão entre elas e através da agitação rápida que promove o choque entre as partículas. Concomitantemente a coagulação, surge o processo de floculação que faz com que as partículas desestabilizadas coalesçam com os precipitados do metal do coagulante químico e formem flocos maiores capazes de sedimentar com maior facilidade. [18]

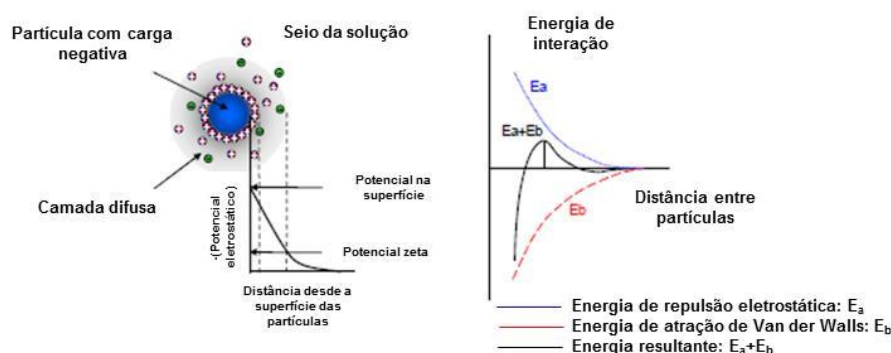


Figura 2: desestabilização das partículas coloidais no seio da solução. [18]

Quase todos os materiais macroscópicos ou particulados em contato com um líquido adquirem uma carga elétrica em sua superfície. Essa carga pode aparecer de várias maneiras – uma delas é a adsorção diferencial de íons da solução na superfície da partícula. A carga líquida na superfície da partícula afeta a distribuição de íons na sua

vizinhança, aumentando a concentração de contra íons junto à superfície. Assim, forma-se uma dupla camada elétrica na interface da partícula com o líquido. ^[12]

Essa dupla camada divide-se em duas regiões: uma região interna que inclui íons fortemente ligados à superfície e uma região exterior onde a distribuição dos íons é determinada pelo equilíbrio entre forças eletrostáticas e movimento térmico. Dessa forma, o potencial nessa região decai com o aumento da distância da superfície até, a uma distância suficientemente grande, atingir o potencial da solução. Esse potencial é convencionalmente chamado de potencial zero. ^[12]

Em um campo elétrico, cada partícula e os íons mais fortemente ligados à mesma se movem como uma unidade, e o potencial no plano de cisalhamento entre essa unidade e o meio circundante são chamados potenciais zeta. ^[12]

Quando uma camada de macromoléculas é adsorvida na superfície da partícula, ela move o plano de cisalhamento para longe da superfície e altera o potencial zeta. Dessa forma, o potencial zeta é função da carga superficial da partícula, de qualquer camada adsorvida na interface com o meio e da natureza e composição do meio que a circunda. Esse potencial pode ser determinado experimentalmente e, como ele reflete a carga efetiva nas partículas, ele se correlaciona com a repulsão eletrostática entre elas e com a estabilidade da suspensão. ^[12]

O potencial zeta é um indicador útil dessa carga e pode ser usado para prever e controlar a estabilidade de suspensões ou emulsões coloidais. Quanto maior o potencial zeta mais provável que a suspensão seja estável, pois as partículas carregadas se repelem umas às outras e essa força supera a tendência natural à agregação. ^[12]

A coagulação é um processo químico complexo que envolve a combinação de vários processos simples. A floculação consiste na agregação de partículas neutralizadas na fase da coagulação, formando-se flocos com a ajuda de um floculante que se liga às mesmas através de “pontes”. Essas ligações surgem a partir das energias de atração de Van der Waals entre duas partículas que predominam sobre as energias de repulsão eletrostática, de modo que as partículas entrem em conjunto e resultem na formação de sólidos de maiores dimensões, como pode ser observado no gráfico de Energia de interação apresentado na Figura 2. ^[18]

Inicia-se com a adição de uma dispersão coloidal através de um reagente químico, geralmente um sal de cátion polivalente, que ativa simultaneamente vários mecanismos de desestabilização coloidais, um dos mais importantes é a compressão da dupla camada elétrica que funciona como um resultado do aumento da força iônica

causado devido à presença deste novo reagente, e outro mecanismo seria o de neutralização da carga de superfície das partículas coloidais, a qual está associada à adsorção de íons na superfície das partículas coloidais. ^[18]

Os flocos vão aumentando de peso e tamanho permitindo a sua sedimentação por ação da gravidade, de forma que posteriormente é possível separá-los do efluente limpo por processos físicos mais simples como a decantação e a filtração. Nesta fase há uma agitação mecânica da massa de água, mas a uma velocidade mais suave, de modo a promover um bom contato entre as partículas e os flocos, e sem que haja a destruição daqueles já formados. ^[18]

Os reagentes químicos mais utilizados são os sais de alumínio e de ferro, pois pela sua multivalência e carga oposta são capazes de adentrar a camada difusa da partícula coloidal e neutralizar, em parte, a carga primária. Além do seu baixo custo e alta eficácia com a menor dose necessária utilizada. ^[11]

Os efluentes provenientes de indústrias possuem geralmente uma elevada carga orgânica, dividida nas frações clássicas de material particulado, fração coloidal e a fração solúvel da matéria orgânica. Essa fração coloidal precisa ser removida antes de passar ao tratamento de frações solúveis do efluente pelos métodos adequados para um tratamento mais eficiente do efluente. ^[11]

Os mecanismos de remoção de matéria coloidal são quatro (Howe *et al.*, 2012): i) compressão da dupla camada elétrica como consequência do aumento da força iônica no seio da solução; ii) neutralização das cargas superficiais pela adsorção de íons na superfície carregada dos coloides, iii) formação de pontes entre partículas coloidais associados à aparição de formas poliméricas dos coagulantes adicionados, e iv) imersão em precipitado, forma eficiente de remoção associada à formação de hidróxidos de ferro e alumínio que embebem em seu interior partículas coloidais. Este mecanismo é conhecido como coagulação ou floculação de varrido (Cotillas *et al.*, 2013). A Figura 3 apresenta alguns dos tipos de mecanismos de coagulação mencionados anteriormente. ^[18]

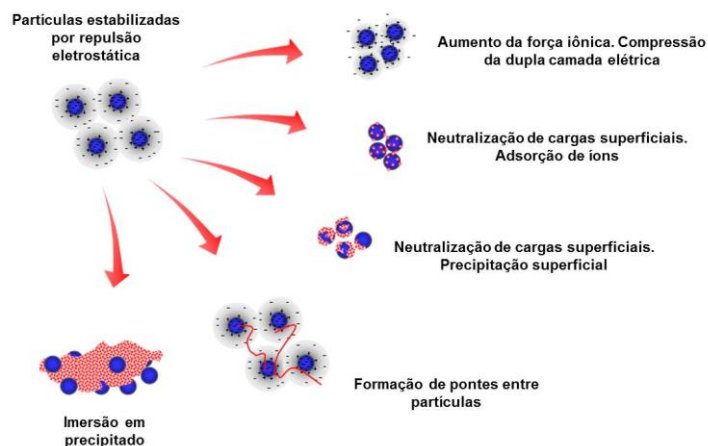


Figura 3: mecanismos de atuação da coagulação. ^[18]

Conseguida a desestabilização do coloide, a seguinte etapa é a formação dos flocos. Isto ocorre quando as forças de repulsão eletrostáticas predominantes nos coloides se tornam menores que as forças de atração de Van der Waals, de forma que a subsequente colisão destes dá lugar a partículas maiores, no processo chamado de floculação. ^[18]

As etapas de floculação são três: i) criação de microflocos por desestabilização da solução coloidal; ii) Criação de macroflocos, a partir dos microflocos, principalmente através de agitação, aumentando as possibilidades de encontro dos floculantes que estabelecem os pontos de contato entre as partículas; iii) Decantação dos floculados. ^[18]

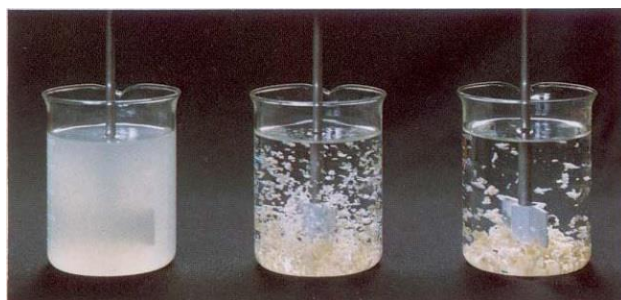


Figura 4: etapas do processo de coagulação/floculação. ^[24]

Como outra opção no tocante ao tratamento de efluentes, principalmente relacionando-se a coagulação química, apresenta-se a técnica de eletrocoagulação.

Esse processo ocorre dentro de um reator eletroquímico composto por dois eletrodos, um o cátodo e o outro o ânodo, que através de uma diferença de potencial aplicada no sistema, o mesmo faz com que ocorra a geração de determinados compostos

in situ, por meio da dissolução de lâminas de metais – alumínio ou ferro que serão responsáveis pela coagulação da matéria coloidal e com isso ocasionando a remoção da matéria orgânica. Ao contrário da coagulação química, nesse sistema não há a necessidade da adição de solução de sais de um reagente químico para que o mesmo realize o processo de coagulação, o que é uma grande vantagem. ^[17]

Durante o processo de eletrocoagulação controla-se a velocidade de aparição desses compostos através do controle da intensidade de corrente aplicada no reator, permitindo a melhor dosificação dos íons responsáveis pela coagulação. ^[17]

Outra vantagem é a geração de gases na superfície dos eletrodos que favorece uma mistura do processo de eletrofloculação – separação dos contaminantes por floculação com a eletroflotação – separação dos contaminantes por flotação. Todos os processos citados anteriormente podem ser bem visualizados com a Figura 5 e explicados separadamente posteriores à mesma. ^[17]

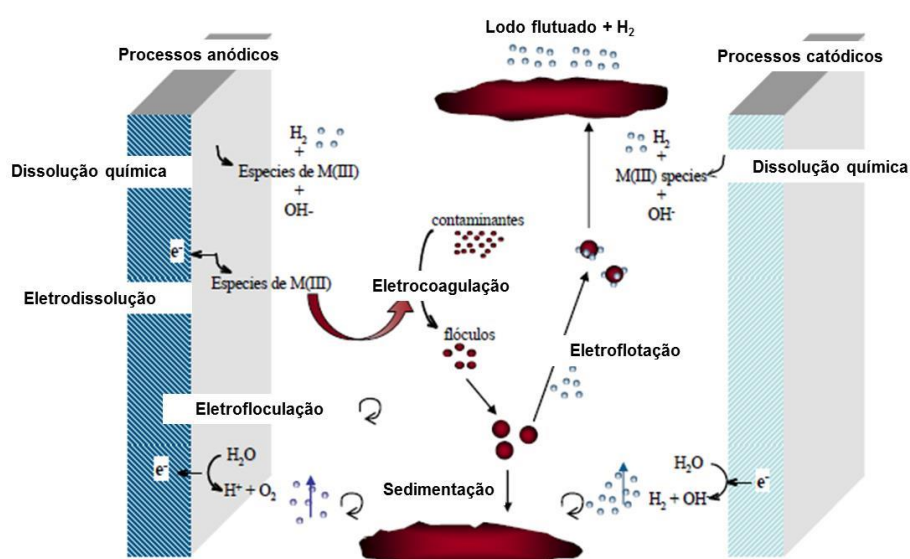


Figura 5: mecanismo de eletrocoagulação. ^[17]

O mecanismo de remoção de matéria coloidal que ocorre na eletrocoagulação é um pouco parecido com o que ocorre na coagulação química, apesar de que nesse sistema como dito anteriormente, ao invés de adicionar diretamente o coagulante em questão, através uma diferença de potencial ocorre a dissolução do ânodo e os compostos que serão responsáveis pela desestabilização das partículas coloidais se tornam presentes na solução em forma de íons fazendo com que as partículas se aglutinem e formem:

- hidróxidos insolúveis sobre os quais os contaminantes são retidos; e
- hidrocomplexos catiônicos ou aniônicos que desestabilizam as forças de repulsão eletrostáticas existentes nas partículas coloidais, e também por neutralização de cargas a partir da formação de ligações intrapartícula.^[17]

Além disso, observa-se que ocorre um incremento na faixa de pH de trabalho em que ocorre o processo, apesar de não ser necessária a alteração inicial do mesmo, observa-se uma alteração ao redor dos eletrodos, e que este favorece a precipitação de hidróxidos metálicos carregados de matéria coloidal que foram adsorvidos sobre os flocos. Isso ocorre devido à geração de outros processos além da geração de coagulantes, como por exemplo, a geração de oxigênio por oxidação da água formando prótons e a redução da água que favorece a formação de íons hidroxila OH⁻ e hidrogênio molecular, comprovando que em uma mesma célula eletroquímica pode ocorrer vários mecanismos de coagulação em conjunto e que os mesmos serão responsáveis pela aparição de um perfil de pH. De acordo com Rajeshwar e Ibáñez, 1997; Mollah et al., 2001, este perfil de pH é responsável por menores quantidades de íons Al ou Fe necessários para se obter um mesmo rendimento no processo, quando se geram estes componentes eletroquimicamente.^[17]

Para melhor compreensão do processo de eletrofloculação citado anteriormente, o mesmo acontece de maneira que os choques entre os colóides ocorrem devido à movimentação das cargas das partículas coloidais que são facilitadas pelo campo elétrico gerado nos eletrodos e pela evolução dos gases também gerados nos mesmos. Assim a floculação ocorre no interior do reator eletroquímico sem a necessidade de uma agitação mecânica, o que traz mais uma vantagem para esse processo, pois diminui os custos com equipamentos e espaço em que o processo será realizado.^[17]

Por fim, para entender o último dos processos que ocorrem no sistema de eletrocoagulação, sabendo que são gerados gases no processo dentro do reator na etapa de eletroflotação, os mesmos formam micro bolhas que causam adesão na superfície dos flocos formados anteriormente na etapa de eletrofloculação, diminuindo a densidade do conjunto e possibilitando a separação por flotação, uma vez que esse conjunto se encontra na superfície do efluente tratado. A principal vantagem desse processo frente à sedimentação que ocorre no processo de coagulação química convencional é permitir eliminar mais eficientemente e em menos tempo essas partículas que por sua vez contém o contaminante do efluente que se deseja separar.^[17]

Outra vantagem expressiva do processo é não haver necessidade da adição de um aditivo químico que auxilie na floculação, assim como não há necessidade de adição de reagentes químicos para o controle do pH, para aumentar o rendimento do processo e conseguir flocos de maior qualidade, caso que ocorre na coagulação convencional, evitando assim a possibilidade de uma contaminação secundária causada por esses agentes químicos, sabendo que a eletrocoagulação gera uma menor quantidade de resíduo e que esse é mais fácil de realizar uma destinação final. Possibilitando sua separação do efluente limpo apenas por técnicas convencionais de separação sólido-líquido como decantação ou flotação.^[17]

Alguns fatores que podem interferir no processo de eletrocoagulação são: a densidade de corrente aplicada, a temperatura em que o processo ocorre e a condutividade da água a ser tratada. A densidade de corrente é um dos parâmetros que merece um maior destaque e que deve ser otimizado para uma melhor eficiência do sistema, visto que determina a quantidade de metal que estará disposto em solução. Altas densidades de corrente correspondem à utilização de menores estações de eletrocoagulação, porém representa um aumento na energia elétrica utilizada para que as reações ocorram, além de aumentar também a potência dissipada em forma de calor. Com isso, a literatura recomenda para um bom funcionamento do processo o uso de correntes inferiores a $20\text{-}25 \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ (Chen, 2004).^[17]

Para avaliação dos custos do processo, a eletrocoagulação apresenta um custo operativo menor em frente aos do processo de coagulação química convencional, levando em consideração todas as vantagens apresentadas acima.

De conhecimento de todos os processos necessários para o tratamento de efluentes, dependendo do tipo da sua contaminação que se deseja eliminar, e da necessidade do cuidado que se deve ter com os resíduos industriais gerados das atividades empresariais, para minimizar o seu impacto ambiental, surge a proposta de uma projeção de um sistema aperfeiçoado para o tratamento de efluentes.

Essa projeção de um sistema eficiente e condizente ao tipo de efluente que será tratado têm como parâmetros norteadores os licenciamentos ambientais da CETESB que preconizam normas para: dimensionamento hidráulico, coleta, transporte e destinação final adequada aos resíduos sólidos retidos; características esperadas para o efluente final; descrição da localização aonde a planta desse sistema se encontra; identificação e caracterização do corpo receptor; especificação técnica dos materiais e outros.^{[4][23][24]}

Escolhendo alguns parâmetros que os licenciamentos citam, para a construção de uma planta industrial mais apropriada, primeiramente é de extrema importância que se caracterize o efluente antes e após o tratamento, para aplicar as operações mais competentes na remoção dos contaminantes presentes, descartando tratamentos desnecessários ou ineficazes, diminuindo assim os custos operacionais e garantindo a permanência nas vigências legais antes de liberar o mesmo em algum corpo hídrico. Por conseguinte, deve avaliar os tipos de materiais que serão utilizados para a construção e o local dessa planta para que possam além de aperfeiçoar o processo também não venham a causar algum dano ambiental maior. E por último, mas não menos importante, a questão do dimensionamento hidráulico para que a empresa tenha um conhecimento prévio da capacidade e das condições em que a planta industrial pode operar de maneira mais efetiva e segura. ^{[4][23][24]}

4. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção se descrevem os reagentes utilizados, as instalações experimentais, os procedimentos operativos e as técnicas analíticas utilizados no trabalho.

4.1. PRODUTOS UTILIZADOS

Os produtos utilizados nos processos de coagulação e eletrocoagulação são listados na Tabela 1.

Tabela 1. Produtos utilizados nos processos de coagulação e eletrocoagulação.

Produto	Função	Procedência	Pureza
Efluente industrial	Substrato a ser degradado	Indústria farmacológica	Desconhecida
Sulfato de alumínio hidratado	Coagulante químico	Vetec	98 – 102%
Cloreto férrico hexahidratado	Coagulante químico	Vetec	97 – 102%
Hidróxido de Sódio	Regulação do pH do efluente	Vetec	P.A.
Ácido clorídrico	Regulação do pH do efluente	Vetec	P.A.
Eletrodos de alumínio	Reagente na eletrocoagulação		
Kit para medida de DQO de baixa concentração	Medidas da DQO	Alfakit	Reagentes comerciais preparados pelo fornecedor

Água Milli-Q	Solvente	Equipamento Millipore	Ultrapura (condutividade abaixo de 1,7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e COT abaixo de 2 ppm)
--------------	----------	-----------------------	------------------------------------------------------------------------------------------

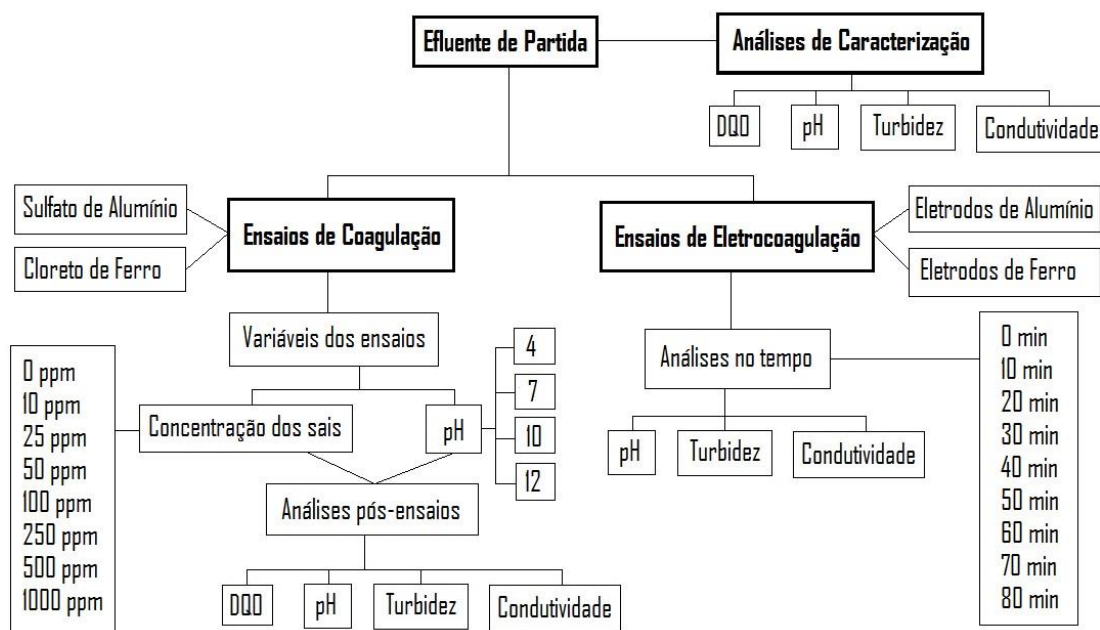


Figura 6. Fluxograma da metodologia utilizada.

4.2. INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS

4.2.1. Sistema de Coagulação Química

Para a realização dos ensaios de coagulação através do método de *Jar Test*, foram utilizados béqueres contendo o efluente, onde foram adicionadas as quantidades necessárias de coagulante. A Figura 7 apresenta uma representação esquemática do sistema utilizado para realizar o teste de jarras.

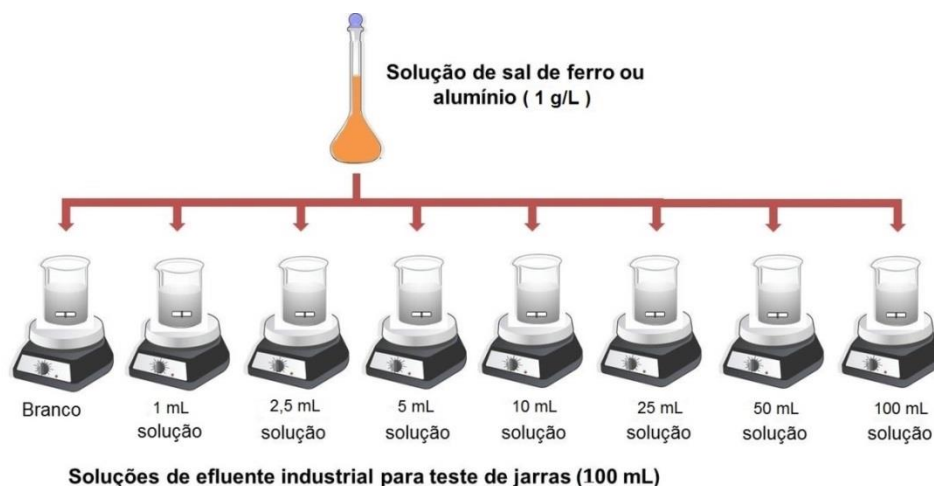


Figura 7. Esquema representativo do sistema implementado para realizar os ensaios de coagulação química.*As quantidades referenciadas abaixo dos agitadores estão relacionadas às quantidades de solução do sal adicionado.

4.2.2. Sistema de eletrocoagulação

Para realizar o processo de eletrocoagulação, primeiramente foi feita a montagem do reator eletroquímico do tipo filtro-prensa a ser utilizado. Este é constituído de duas placas suporte de acrílico com oito furos em cada, uma entrada e uma saída para o efluente que será tratado, dois eletrodos (alumínio ou ferro - material tanto anódico quanto catódico) quadrados de 10 cm × 10 cm afixados no centro de cada placa de acrílico. Para garantir a aderência desejada do material e evitar vazamentos, foi utilizada uma resina comercial epóxi, seguidos de um contato elétrico externo por onde a corrente fluirá e antes de parafusar o reator para uma melhor vedação do sistema foram utilizadas juntas de silicone. Uma melhor compreensão do reator proposto pode ser alcançada com a ilustração apresentada na Figura 8.

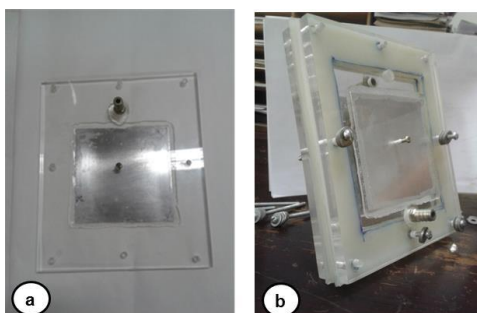


Figura 8. a) Imagem de uma placa de acrílico com o eletrodo de alumínio aderido e, b) Reator ensablado para eletrocoagulação.

Os componentes que conformam a instalação experimental são o reator eletroquímico, parte fundamental para o desenvolvimento do trabalho, uma bomba de aquário capaz de vencer uma perda de pressão de 0,2 m de coluna de água (equivalente a 2 kPa), sistema de mangueiras que permitem a conexão do tanque de alimentação ao reator e saída deste até o resfriador e retorno ao reator (operação em recirculação total). O resfriador utilizado foi um condensador de vidro de 60 cm de comprimento, sendo utilizado um banho termostático para controle da temperatura (fixada entre 15 e 20°C em função da intensidade de corrente utilizada). Para controle da corrente aplicada ao sistema foi utilizada uma fonte de alimentação (Dawer, 30V, 5A) e um multímetro para monitoramento da voltagem (Mimipo, ET-1002). Todas as conexões elétricas foram feitas com fiação de cobre. O conjunto da instalação experimental é apresentado na Figura 9.

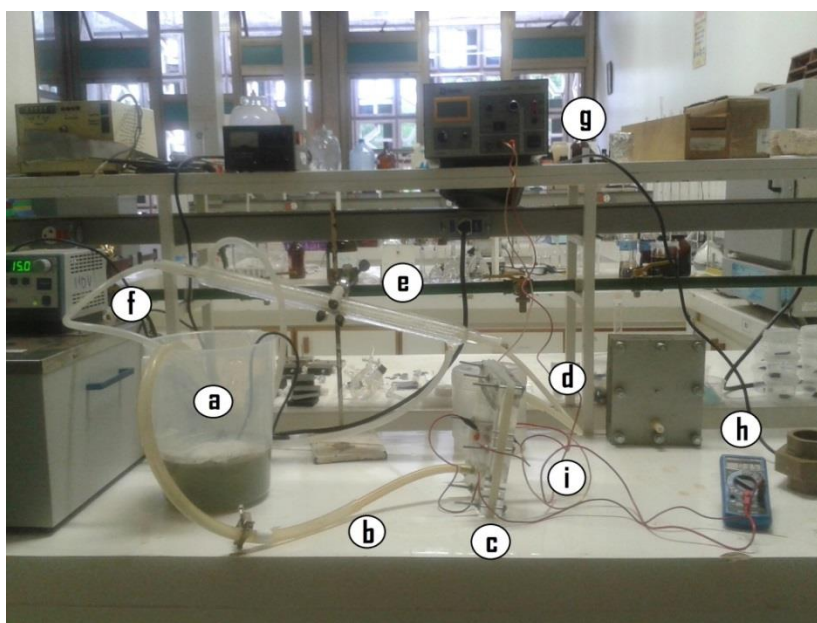


Figura 9. Instalação experimental do processo de eletrocoagulação. a) Amostra de 2 litros de efluente. b) Mangueira de entrada do efluente no reator eletroquímico. c) Reator eletroquímico. d) Mangueira de saída do efluente no reator eletroquímico. e) Condensador para manter o processo de forma contínua. f) Mangueira de retorno do efluente tratado. g) Potenciostato para o fornecimento da corrente desejada ao sistema. h) Multímetro para realizar as medidas de voltagem. i) Contatos elétricos.

4.3. PROCEDIMENTO OPERATIVO

4.3.1. Caracterização do efluente de partida

O efluente de partida foi coletado na saída da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de uma indústria farmacocômica de Anápolis (Goiás – agosto de 2015). O aspecto visual da água é apresentado na Figura 4.5. Foram caracterizados como principais parâmetros de partida a DQO, condutividade, pH e turbidez do efluente.

4.3.2. Ensaio de coagulação química

Para realizar os ensaios de coagulação química do efluente industrial foram utilizados dois tipos de coagulantes químicos: o sulfato de alumínio hidratado - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (Vetec Química) e o cloreto férrico hexahidratado - $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Vetec Química). Prepararam-se soluções de ambos os reagentes em mesmas concentrações de 1 g L^{-1} a partir das quais se adicionaram as quantidades correspondentes em béqueres contendo 100 mL do efluente bruto, para cada volume de coagulante adicionado: 1 mL, 2,5 mL, 5 mL, 10 mL, 25 mL, 50 mL e 100 mL.

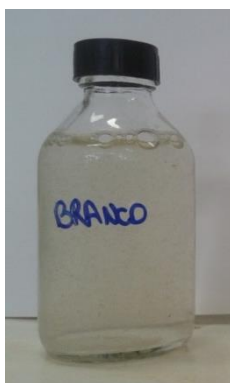


Figura 10. Imagem do efluente bruto utilizado.

A sequência operativa foi:

- Controle de pH com solução de NaOH 4M ou HCl 2M, tendo como pH de trabalho = 4, 7, 10 e 12.
- A adição do coagulante nas doses requeridas.

- Agitação rápida por 5 minutos em 200 rpm e lenta por 25 minutos em 50 rpm, com auxílio de agitador magnético.
- Tempo de decantação de 30 minutos.

Para a realização das análises de DQO, condutividade, turbidez e pH foram recolhidas alíquotas de 50 mL do sobrenadante com o auxílio de uma seringa e transportado para um tubo de vidro com tampa, com o cuidado para não recolher o material sedimentado. As amostras foram armazenadas em refrigeração para evitar a degradação de possíveis compostos presentes e causar interferências nos resultados posteriores.

4.3.3 Sistema de Eletrocoagulação

Os ensaios de eletrocoagulação foram realizados em condições de recirculação total para 2 litros de efluente, com uma densidade de corrente de 2 mA cm^{-2} para os eletrodos de ferro e uma densidade de corrente de 5 mA cm^{-2} para os eletrodos de alumínio. A densidade de corrente é diferenciada para os eletrodos devido aos cálculos realizados com os resultados obtidos previamente pela coagulação química e por consulta a literatura que determina essas densidades como um parâmetro otimizado para os eletrodos. O tempo total de eletrólise foi de 80 minutos para ambos. Os parâmetros de controle da qualidade do efluente foram os mesmos que no caso anterior.

4.4. TÉCNICAS ANALÍTICAS

4.4.1. Determinação de Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A análise de demanda química de oxigênio (DQO) é uma medida indireta da quantidade de material susceptível de oxidação química presente em um efluente aquoso. Para realizar a análise de DQO se segue o procedimento descrito na norma ASTM D1252 para a digestão em tubo fechado e medida espectrofotométrica. O procedimento básico consiste na mistura de 3,5 mL de uma solução de catalisador de Ag_2SO_4 em ácido sulfúrico concentrado (98%) em uma proporção 5,5 gramas de sal por kg de ácido. A seguir se adicionam 1,5 mL da solução digestora, composta por 1,022 g K_2CrO_7 , 167 mL H_2SO_4 , e 33,3 g HgSO_4/L de solução. Finalmente, adicionam-se

lentamente 2,5 mL de efluente, tomando cuidado com o processo de aquecimento efetuado pela amostra na combinação de todos os reagentes. As medidas foram realizadas com ajuda de um kit comercial da empresa Alfakit Ltda. (Florianópolis, SC), contando com os tubos de digestão, digestor microprocessado (processo de digestão a 150°C durante 2 horas) e o fotolorímetro AT10PII. O fotolorímetro é previamente calibrado, permitindo obter a leitura direta de *mg de O₂ equivalentes/L*.

4.4.2. Determinação de Turbidez, Condutividade e pH

A análise de turbidez informa o aumento ou a diminuição da transparência da amostra analisada, ou seja, a quantidade de partículas sólidas em suspensão que formam coloides na amostra e interferem na propagação da luz pela água. A turbidez pode assim ser causada por uma enorme variedade de materiais em suspensão, de origem orgânica ou inorgânica, variando em dimensão desde partículas coloidais até sólidos de dimensões macroscópicas. Esta análise é medida através das unidades de turbidez nefelométricas conhecidas como NTU, sigla que provém do inglês *Nephelometric Turbidity Unit*. De acordo com as normas da Resolução 430 de 2011 do CONAMA para controle de efluentes, a mesma deve apresentar medida de remoção de no mínimo 20% de sólidos em suspensão totais quando comparado ao efluente antes do tratamento para ser disposto em qualquer corpo receptor. As medidas foram realizadas com a ajuda de um turbidímetro (Alfakit) que já vem previamente calibrado, permitindo obter a leitura direta em NTU.

A análise de condutividade elétrica informa a quantidade de sais dissolvidos na amostra que possuem cargas elétricas – os íons, apesar de não fornecer dados reais sobre as concentrações de um determinado íon, uma vantagem dessa técnica é por se tratar de uma medida rápida, fácil e bastante efetiva. Muito utilizada para controle de qualidade de águas. Quanto menor a sua condutividade apresentada mais pura será a água analisada, visto que a molécula da água não apresenta a propriedade de condução de eletricidade. Esta análise é medida através de Siemens (S), miliSiemens (mS) ou microSiemens (µS) por centímetro. As medidas obtidas durante o processo foram realizadas com a ajuda de um condutivímetro (Adamo, mCa 150) através da inserção de dois eletrodos de platina em um determinado volume de amostra, o equipamento já vem previamente calibrado.

Por último, a análise de pH informa a concentração de íons H^+ presentes na amostra, responsável por vários equilíbrios químicos que ocorrem no efluente, controlando a maior parte das reações químicas e das atividades biológicas que ocorrem ali dentro, dependendo da faixa de pH apresentada. Devido a essa preocupação com o pH em que o efluente apresenta, a Resolução 430 de 2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, no seu artigo 16 da Seção II preconiza as condições e padrões de lançamentos de efluentes num corpo receptor, especificando para o controle do pH o efluente deve se encontrar numa faixa entre 5 a 9. As medidas foram realizadas através de um pHmêtro (Quimis) que traz resultados diretos sobre a escala de acidez, e a cada medida o pHmêtro foi calibrado com soluções padrões.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos neste trabalho. Como comentado nos objetivos, foram objeto de estudo variáveis típicas de processos coagulativos como o coagulante utilizado, a dose deste e o pH inicial do efluente. Com ajuda dos resultados do estudo de coagulação química, é possível determinar a densidade de corrente a aplicar para um processo de eletrocoagulação para um tempo predeterminado. Fixada a corrente, apresentam-se os resultados do processo de eletrocoagulação com eletrodos de dois materiais diferentes, sendo avaliada a eficiência do processo para cada um deles.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DE PARTIDA

Com o intuito de melhor compreender os resultados dos tratamentos que seriam aplicados sobre o efluente, fez-se uma pré-caracterização do efluente bruto para os parâmetros físico-químicos que seriam avaliados durante cada processo. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos para o efluente bruto, observando que para os valores encontrados de amônia, sulfato, nitrato e nitrito os testes foram realizados através de kits comerciais da Alfakit e a amostra teve uma diluição de 1:5.

Tabela 2. Parâmetros físico-químicos avaliados para o efluente bruto

Turbidez	83,76 NTU
Condutividade	1298 $\mu\text{S}/\text{cm}$
pH	7,3.
DQO	63,46 mg/L de O ₂
Amônia	1,06 mg/L de N-NH ₃
Sulfato	2,87 mg/L de S ₂
Nitrato	0 mg/L de N-NO ₂
Nitrito	0 mg/L de N-NO ₃

5.2. COAGULAÇÃO QUÍMICA

Com o objetivo de avaliar a eficiência na remoção de matéria coloidal foram realizados experimentos variando a concentração de coagulante aplicado nas amostras de 100 mL e a faixa de pH de trabalho. Como primeiro parâmetro a ser avaliado para mensurar a efetividade da coagulação química, monitorou-se a turbidez do efluente tratado para as diferentes doses de coagulante. A Figura 11 apresenta os resultados correspondentes.

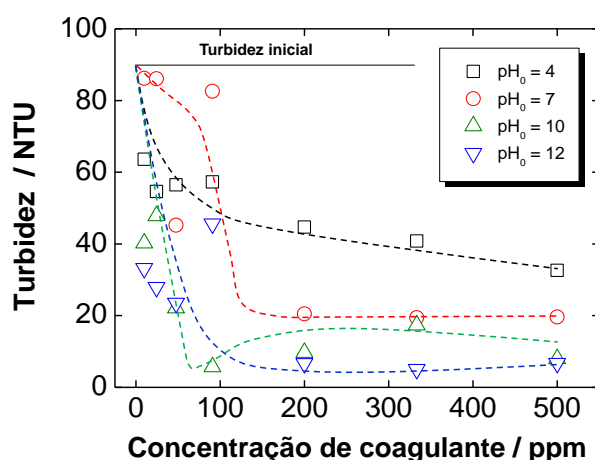


Figura 11. Evolução da turbidez com a dose de sulfato de alumínio para os diferentes pH iniciais.

Como pode ser observado, o processo de coagulação química apresenta uma elevada eficiência para remoção de matéria coloidal, medida indireta da concentração de partículas coloidais. De acordo com os resultados apresentados, a maior remoção absoluta é obtida para os pH mais alcalinos, especialmente para pH 12, visto que são

necessárias doses mais elevadas de coagulante, acima de 200 ppm. Já a pH 10, existe um mínimo de turbidez para uma dose de 90 ppm. Este valor é especialmente interessante já que permite adicionar menos coagulante que no caso do pH inicial de 12 e ainda alcalinizar em menor proporção o efluente inicial (isto faz necessário a adição extra de um álcali).

A Figura 12 apresenta a evolução da condutividade com a dose de coagulante adicionada para cada um dos pH's objeto de estudo. Pode-se perceber que, existe uma tendência geral ao aumento da condutividade com a dose de coagulante exceto para o pH 12 onde é observado um decaimento inicial. Também é interessante observar os valores iniciais da condutividade. O pH inicial da amostra é 7,3, de forma que ao pH de 7, a dosagem corretora do pH é mínima. Já aos outros pH é necessário adicionar ácido ou álcali para modificar o pH, o que leva ao aumento observado na condutividade inicial.

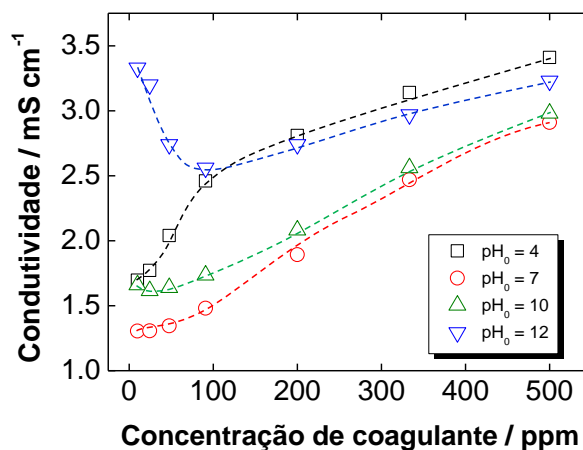
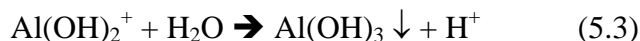
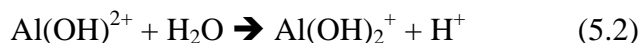


Figura 12. Evolução da condutividade com a dose de sulfato de alumínio para os diferentes pH iniciais.

O aumento observado na condutividade com a dose de coagulante se deve à presença de uma maior carga iônica no meio pela adição do próprio sal. Entretanto, a queda no caso do pH 12 pode ser explicada pelo próprio mecanismo do processo de eletrocoagulação. Em pH's mais alcalinos, o alumínio adicionado se torna hidróxido de alumínio, o qual precipita. É possível que o precipitado, na sua formação, consiga envolver algumas espécies iônicas que são arrastadas para dentro do floco formado, conduzindo à queda na condutividade. Este comportamento se limita às doses

mais baixas devido à evolução que segue o pH durante a coagulação química (CAÑIZARES *et al.*, 2009a). O alumínio é uma espécie ácida que em solução hidrolisa para formar oxicações de acordo com as reações 5.1 a 5.3.



Desta forma, é esperado uma diminuição do pH e, portanto, uma redução na quantidade de hidróxido formado acompanhado do aumento intrínseco da condutividade pela própria dosagem do sal.

A Figura 13 apresenta a evolução da DQO com a dosagem de coagulante aos diferentes pH iniciais.

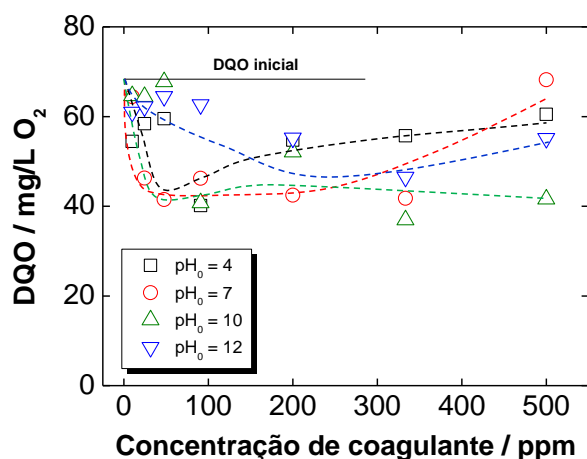


Figura 13. Evolução da DQO com a dose de sulfato de alumínio para os diferentes pH iniciais.

Sendo assim, existe uma remoção de DQO com a adição do coagulante, o que se encontra associado à remoção da matéria coloidal junto com parte de matéria orgânica solúvel que é removida por imersão ou adsorção nos flocos formados na coagulação química. Especialmente eficiente se mostra a remoção para um pH inicial de 10 para a dose de coagulante de 90 ppm, o que é concomitante com o comportamento observado para a turbidez (CAÑIZARES *et al.*, 2007). A remoção mais eficiente a pH

7 e 10 se deve ao fato do hidróxido de alumínio apresentar a menor solubilidade perto dessa faixa de pH. Nos pH mais ácidos, onde o mecanismo de remoção de coloides se baseia na neutralização de cargas pela presença de Al^{3+} , é possível observar que a remoção não é eficiente. Em pH's mais alcalinos, produz-se o fenômeno de formação de aluminatos que tem por efeito a estabilização dos coloides e a remoção ineficiente da DQO.

O conjunto de todos os resultados apresentados parece conduzir a uma dosagem ótima de coagulante de 90 ppm de sulfato de alumínio com um pH inicial ajustado a um valor de 10. Com isto é possível não aumentar excessivamente a condutividade removendo de forma eficiente a máxima fração possível de turbidez e DQO quando comparado aos outros resultados, utilizando uma menor dose de reagente químico. As imagens dos efluentes após os tratamentos de coagulação química com sulfato de alumínio estão dispostas nas Figuras 14 a 17.

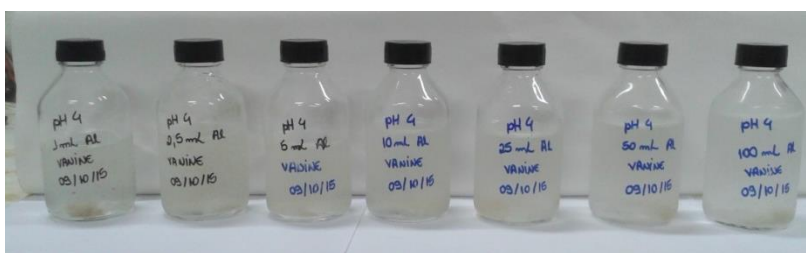


Figura 14. Sequência operativa de coagulação química com sulfato de alumínio em pH 4.

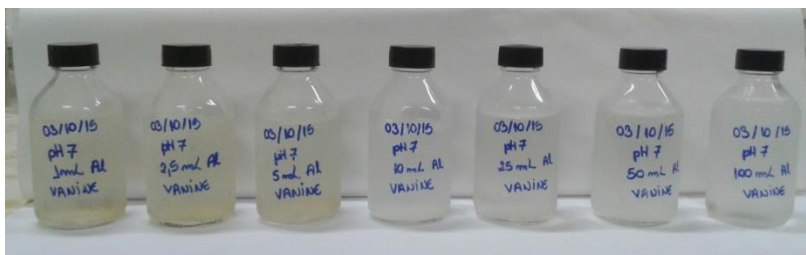


Figura 15. Sequência operativa de coagulação química com sulfato de alumínio em pH 7.



Figura 16. Sequência operativa de coagulação química com sulfato de alumínio em pH 10.



Figura 17. Sequência operativa de coagulação química com sulfato de alumínio em pH 12.

Seguindo a mesma sequência operativa que no caso do alumínio foram realizados os ensaios com cloreto de ferro como coagulante. A Figura 18 apresenta a evolução da turbidez com a dose de cloreto férrico adicionado para os diferentes pH iniciais. Como pode ser observado, existe uma remoção eficiente da turbidez para quase todos os pH iniciais, especialmente para as menores doses de cloreto férrico, mostrando a eficiência do ferro para remover matéria coloidal do efluente. No entanto, para as doses mais elevadas de coagulante, observa-se um comportamento muito diferente em função do pH inicial, principalmente para os pH mais elevados. Como podem ser notadas, altas doses de coagulante em pH's iniciais mais elevados levam a um incremento drástico da turbidez. Para entender este comportamento, é interessante considerar as fotografias dos efluentes tratados. Sendo assim, em doses de coagulante mais elevadas para os pH iniciais mais alcalinos, o sobrenadante do efluente tratado apresenta uma tonalidade alaranjada devido à presença do ferro. Igual ao alumínio, o ferro também hidrolisa quando adicionado ao meio seguindo reações equivalentes àquelas (reações 5.4 a 5.6) conduzindo a uma diminuição do pH da solução.



Para as mesmas dosagens de coagulantes, é esperado que o pH inicial influencie na distribuição de espécies existentes em solução (equilíbrio Fe^{3+} - $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ - $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ - $\text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow$), de forma que aos pH iniciais mais altos, para as mesmas dosagens de coagulante, é provável que as espécies presentes em solução sejam diferentes, com uma maior proporção de oxicações $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ e $\text{Fe}(\text{OH})_3 \downarrow$ que talvez dão à solução a

tonalidade alaranjada mais intensa observada na Figura 23 e 24. Além disto, é sabido que estas espécies são mais ineficientes para a remoção da matéria coloidal tal como observado na Figura 18 (ZALESCHI *et al.*, 2012).

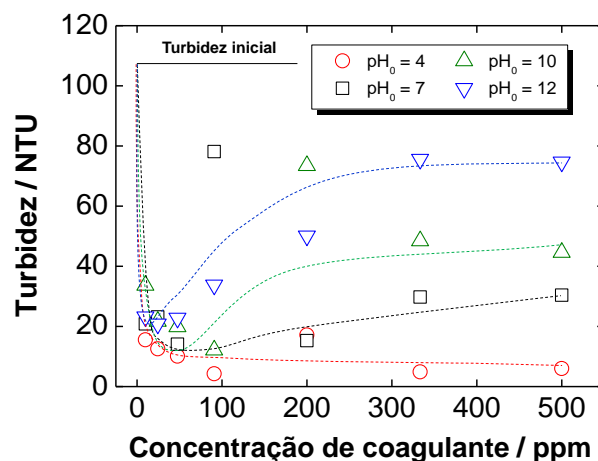


Figura 18. Evolução da turbidez com a dose de cloreto de ferro para os diferentes pH iniciais.

A Figura 19 apresenta a evolução da condutividade durante o processo de coagulação com cloreto férrico. Como no caso do alumínio, a tendência geral é o aumento na condutividade com a dose de coagulante, devido à adição de íons ao meio. Igualmente, a menor condutividade se apresenta para o pH 7, o mais próximo ao pH natural do efluente, demandando uma correção menor de pH que nos outros casos em que foi necessário adicionar um ácido ou um álcali. Para o pH inicial de 12 existe uma queda inicial da condutividade, explicada pelo arraste de alguns íons presentes em solução durante a esperada formação de hidróxido férrico nesse pH, sendo observado um aumento naquela para doses acima de 200 ppm devido à grande adição de sal de cloreto férrico. Estes resultados alertam da problemática na adição de grandes doses de coagulante devido à elevação da condutividade do efluente tratado, que pode causar a deterioração das tubulações dos equipamentos, devido à presença desses sais em maiores quantidades que podem formar incrustações no interior do sistema.

A Figura 20 apresenta a evolução da DQO durante a eletrocoagulação com cloreto férrico para os diferentes pH.

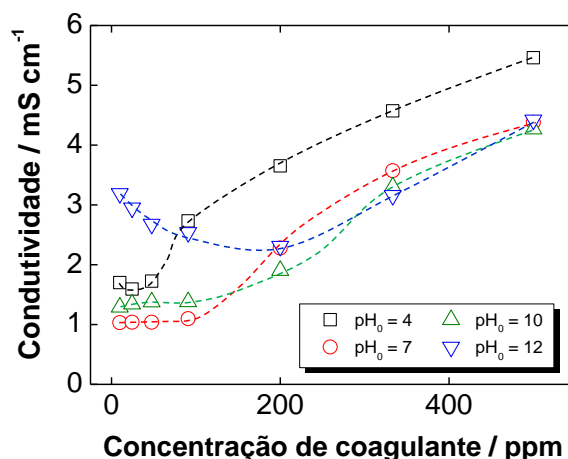


Figura 19. Evolução da condutividade com a dose de cloreto de ferro para os diferentes pH iniciais.

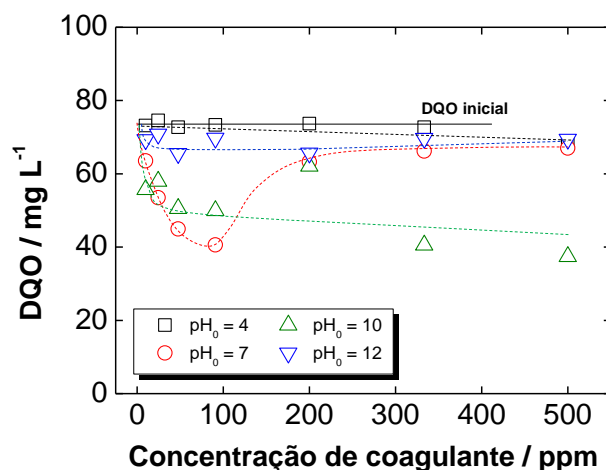


Figura 20. Evolução da DQO com a dose de cloreto de ferro para os diferentes pH iniciais.

Como pode ser observado, o melhor desempenho em termos de remoção de DQO se obtém para o pH inicial de 7, mais próximo ao pH natural para uma dose de coagulante de 90 ppm. De fato, é neste pH e ao redor desta dosagem onde é possível remover a maior quantidade de DQO. Doses maiores de cloreto férrico não proporcionam melhorias para remoção de matéria orgânica, o que pode ser devido à elevada concentração de cátions férricos em solução, o que poderia resultar em uma estabilização da matéria orgânica comparado à remoção eficiente para a dose ótima de 90 ppm, na qual é esperado que parte dessa matéria orgânica fique embebida dentro da estrutura dos flocos de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ formados.

O resultado apresentado para os pH de 4 e 12 é significativo, porém não causa o efeito desejado, devido a pouca ou nenhuma remoção efetiva de matéria orgânica, indicando que a correção do pH inicial do efluente não é eficaz.

Os resultados apresentados evidenciam que o sistema que se mostrou mais eficiente foi o correspondente a 90 ppm em um pH 7 de trabalho, que caracteriza se como um ótimo para o coagulante de FeCl_3 , visto que apresenta uma baixa condutividade, uma boa remoção de turbidez e uma boa demanda química de oxigênio quando comparado aos outros resultados, utilizando uma menor dose de reagente químico. A sequência de Figuras 21 a 24 apresenta o aspecto final do efluente tratado para cada um dos pH.



Figura 21. Sequência operativa de coagulação química com cloreto férrico em pH 4.

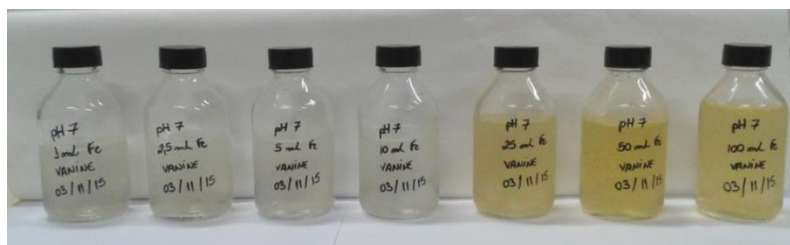


Figura 22. Sequência operativa de coagulação química com cloreto férrico em pH 7.



Figura 23. Sequência operativa de coagulação química com cloreto férrico em pH 10.



Figura 24. Sequência operativa de coagulação química com cloreto férrico em pH 12.

5.3. ELETROCOAGULAÇÃO

5.3.1. Eletrocoagulação com eletrodos de ferro

Uma vez concluídos os experimentos de coagulação química, visto que a técnica se mostrou eficiente para a remoção da matéria coloidal e de uma fração importante da matéria orgânica, propõe-se como alternativa o uso da eletrocoagulação com eletrodos de ferro e de alumínio. A Figura 25 apresenta os resultados da evolução da turbidez durante o experimento realizado com eletrodos de ferro. A Figura 26 apresenta o aspecto do efluente tratado para cada um dos tempos de coleta de amostra.

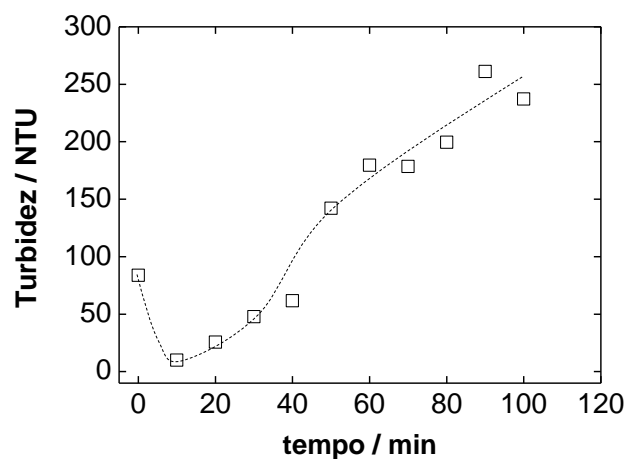


Figura 25. Evolução da turbidez durante o processo de eletrocoagulação com eletrodos de ferro (densidade de corrente de 2 mA cm^{-2}).

Como pode ser observado, existe uma remoção intensa de turbidez para os instantes iniciais do processo de eletrocoagulação, após os quais nota-se um crescimento contínuo desta. Este resultado confirma os apresentados para a

coagulação química, onde a remoção com melhor desempenho se apresenta para pequenas doses de coagulante, após as quais a turbidez não é mais removida de forma eficiente. De fato, o aspecto visual dos efluentes tratados evidencia que para doses altas de ferro é visível a solução se torna mais turva com a provável presença de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ em suspensão. Este resultado frisa a importância na escolha na dose de coagulante já que uma dose excessiva deste pode resultar na estabilização dos coloides (JIMÉNEZ *et al.*, 2012; ZHAO *et al.*, 2012) e, inclusive, na presença massiva de ferro em suspensão com a conseguinte deterioração do efluente tratado.



Figura 26. Sequência operativa de eletrocoagulação com eletrodo de ferro

A Figura 27 apresenta a evolução da condutividade durante o processo de eletrocoagulação com eletrodos de ferro metálico.

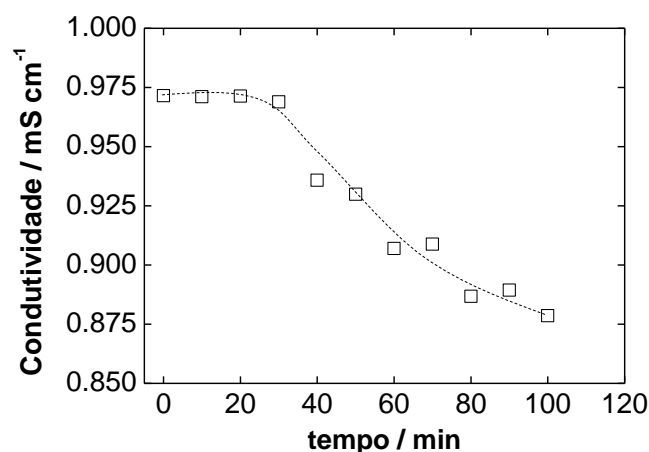
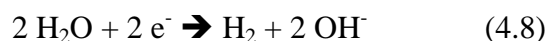
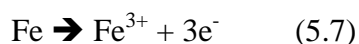


Figura 27. Evolução da condutividade durante o processo de eletrocoagulação com eletrodos de ferro.

Diferente da coagulação química, a eletrocoagulação apresenta a vantagem de não aumentar a condutividade durante o processo. Isto se deve ao fato das reações eletroquímicas que ocorrem dentro do sistema (equações 5.7 e 5.8).

Para entender este comportamento é interessante examinar o comportamento do pH durante o processo (Figura 28). Na eletrocoagulação com eletrodos de ferro, existe um leve aumento do pH durante o processo, contrariamente ao observado na coagulação química onde é apresentada uma diminuição constante deste. Isto se deve à geração de ânions hidroxila no cátodo, os quais compensam a acidez do Fe^{3+} no ânodo, e ainda favorece a formação de precipitado de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (MARTINEZ NAVARRO, 2007; JIMENEZ IZQUIERDO, 2011).

É possível que uma pequena fração dos íons presentes em solução passe a formar parte dos flocos de hidróxido férrico formados, retirando-os da solução e levando à observada diminuição da condutividade. A ausência de aumento na condutividade é, de fato, uma vantagem da eletrocoagulação frente à coagulação química convencional.



A Figura 28 apresenta a evolução do pH durante o processo de eletrocoagulação.

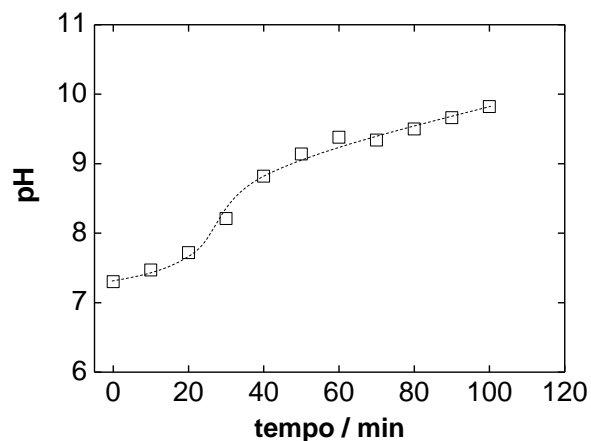


Figura 28. Evolução do pH durante o processo de eletrocoagulação com eletrodos de ferro.

Como pode se perceber, o pH, durante o processo de eletrocoagulação, aumenta gradualmente. Este fenômeno é explicado pelas próprias reações que ocorrem dentro do reator eletroquímico tal como explicado acima, sendo este fato uma vantagem frente ao processo de coagulação já que não requer o ajuste de pH (CAÑIZARES *et al.*, 2007; CAÑIZARES *et al.*, 2009b) Notando que na mesma, a acidificação ocorre quando adicionados os sais de ferro.

5.3.2. Eletrocoagulação com eletrodos de alumínio

Seguindo a sequência operativa do ferro, foi realizado um estudo equivalente com o alumínio. A Figura 29 apresenta a evolução da turbidez com o tempo.

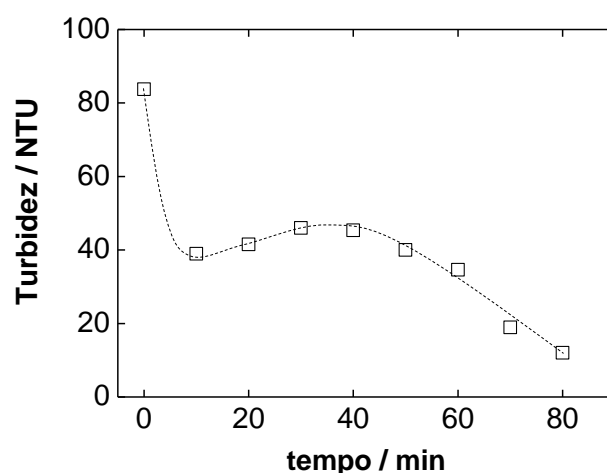


Figura 29. Evolução da turbidez durante o processo de eletrocoagulação com eletrodos de alumínio (densidade de corrente de 5 mA cm^{-2}).

Como pode ser observado, o processo de eletrocoagulação com alumínio também é eficiente na remoção de matéria coloidal assim como o ferro. No entanto, o comportamento é diferente já que é necessário um tempo maior para ter uma remoção mais intensa de alumínio apesar de ter sido usado uma densidade de corrente maior. O fato de usar esta densidade de corrente superior se baseia no fato de serem necessárias maiores doses de coagulante no caso de utilizar Al como agente de coagulação. A Figura 30 apresenta a evolução da condutividade com o tempo.

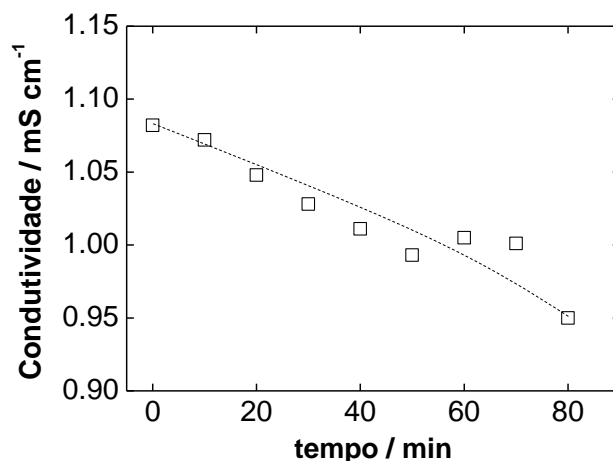
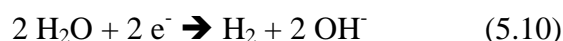
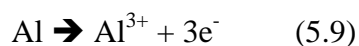


Figura 30. Evolução da turbidez durante o processo de eletrocoagulação com eletrodos de alumínio.

Como pode ser observado, existe, como no caso do ferro, um decréscimo na condutividade, da mesma forma que o ferro pode ser explicado pelo arraste de íons do efluente durante o processo de eletrocoagulação, o alumínio apresenta um arraste pelos flocos de hidróxido de alumínio formados, levando em consideração as semi-reações que acontecem no sistema (equações 5.9 e 5.10).



A evolução do pH durante o processo de eletrocoagulação ajuda a compreender melhor o comportamento da condutividade (Figura 31). Sendo assim, o pH se incrementa durante o processo de eletrocoagulação, devido à geração de ânions hidroxila no cátodo que compensam a acidez dos cátions alumínio gerados no ânodo. O pH de trabalho ótimo para a eletrocoagulação com alumínio está na faixa de 7 a 9 (ZALESCHI *et al.*, 2013). No entanto, os flocos formados de hidróxido de alumínio parecem ser menos eficientes na remoção da matéria orgânica comparados aos de ferro, onde com uma dose menor é possível remover uma maior quantidade de matéria coloidal, ainda modificando minimamente o pH e a condutividade do efluente tratado.

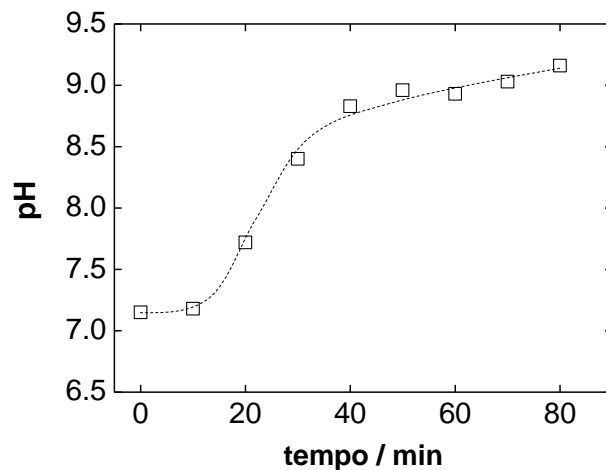


Figura 31. Evolução do pH durante o processo de eletrocoagulação com eletrodos de alumínio

A Figura 32 apresenta o aspecto do efluente tratado para cada um dos tempos do processo de eletrocoagulação com alumínio.



Figura 32. Sequência operativa de eletrocoagulação com eletrodo de alumínio.

Como pode ser observado, apenas para as doses mais elevadas de alumínio aparecem quantidades maiores de precipitado de hidróxido de alumínio, eficientes na remoção dos colóides em solução.

5.4. PROPOSTA DE PLANTA DE ELETROCOAGULAÇÃO

Os resultados apresentados no item anterior demonstram que a eletrocoagulação é uma boa alternativa para tratar o efluente proposto no presente trabalho, especialmente no caso do ferro onde com doses pequenas é possível ter uma remoção eficiente da matéria coloidal presente no efluente. Assim, nesta seção é feita uma proposta de sistema de eletrocoagulação para poder tratar efluentes de natureza similar mediante um sistema operando de forma similar ao estudado neste trabalho de conclusão de curso. A ideia básica do sistema em trabalhar em batelada com tempos de ciclo do processo de eletrocoagulação equivalentes de 10 minutos. Uma vazão típica de efluente de indústria farmacêutica se encontra na faixa de 20 a 100 m³ d⁻¹ (MARTZ, 2012). Para o projeto, consideraremos o caso mais extremo com uma vazão volumétrica média de 100 m³ d⁻¹. Este valor se corresponde com uma vazão volumétrica em litros por minuto de 87,7. As características da instalação utilizada neste estudo são as seguintes: tratamento de 2 litros de efluente em um tempo de 10 minutos com uma densidade de corrente aplicada de 2 mA cm⁻². A vazão de circulação do efluente é de 500 ml min⁻¹ com eletrodos de 10 cm × 10 cm (100 cm² de área ativa) com um espaço entre os eletrodos de 1 cm aproximadamente. O volume do compartimento do reator é de aproximadamente 200 cm³ com uma seção transversal de 12 cm².

Para o tratamento pertinente de 87,7 L min⁻¹, de acordo com os dados apresentado acima, será necessário um sistema com uma área total de 4,39 m² (proporcionalidade direta entre vazões) além de um tanque de 877 litros que permita conter um volume de efluente que receberá tratamento por 10 minutos. A utilização de uma única unidade com essa área de eletrodo, mantendo a densidade de corrente utilizada nos estudos de bancada, requereria de uma corrente elétrica de 87,8 A. Em lugar de usar uma densidade de corrente tão elevada, sugere-se usar unidades de menor tamanho e colocar esses reatores de menor tamanho em série (menores correntes reduzem as perdas de dissipação por calor associado a resistências elétricas). Se placas de ferro forem consideradas tendo 0,5 m × 0,5 m (0,25 m²) serão necessárias 18 unidades para poder satisfazer a área necessária de eletrodo. A corrente que circulará por cada uma destas unidades será de 5 A. A voltagem medida nos experimentos de eletrocoagulação com ferro foi de 4,2 V de media. Para a associação de 18 unidades em série, a voltagem necessária será de 75,6 V, o que implica que a potência de consumo da instalação é de 378 W. A vazão de circulação da bomba de alimentação ao sistema de

eletrocoagulação se calcula considerando que no estudo de bancada, no tratamento de 2 litros, foi utilizada uma vazão de $0,5 \text{ L min}^{-1}$, de forma que após 4 minutos todo o efluente teoricamente passou pelo reator de eletrocoagulação. Para o sistema industrial, para um volume de tanque de 877 litros, é necessária uma vazão de $219,5 \text{ L min}^{-1}$ (aproximadamente $13 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$) a dividir entre as 18 células ($12,19 \text{ L min}^{-1}$ por cada célula). O objetivo desta bomba é garantir a vazão vencendo as perdas de carga do sistema de eletrocoagulação.

Além de o sistema principal consistir no tanque, reator de eletrocoagulação e bomba, são necessários também colocar sistemas adicionais tais como um sedimentador anexo ao sistema de eletrocoagulação para deixar os flocos sedimentarem, um filtro prensa que permita a separação dos flocos do resto de sobrenadante que seja arrastado com os sólidos provenientes do sedimentador e um compartimento para o controle do pH após o efluente ser tratado. Também é recomendável realizar um pequeno dimensionamento do sistema para considerar os tempos mortos que todo sistema em batelada possui, associado à carga e descarga do sistema de eletrocoagulação. Um desenho esquemático desta instalação se apresenta na Figura 33.

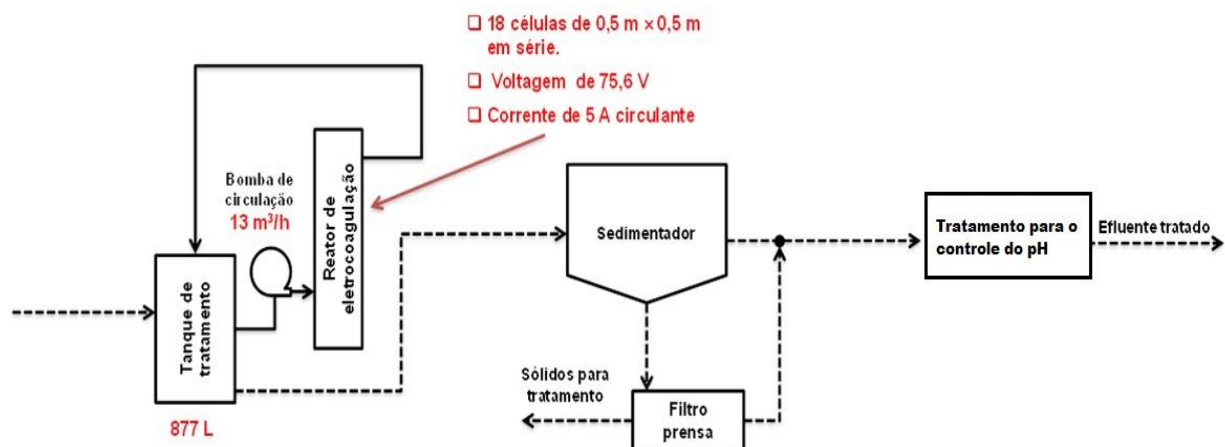


Figura 33. Esquema de uma instalação de eletrocoagulação (as linhas contínuas representam as correntes específicas à unidade, as linhas pontilhadas representam as correntes auxiliares).

6. CONCLUSÃO

De acordo com os procedimentos realizados e os dados obtidos é possível concluir que quando se refere ao processo de coagulação química consegue se determinar um pH e uma dosagem adequados de reagente químico que se deve adicionar ao efluente para se obter uma boa remoção de matéria orgânica e decidir o melhor coagulante a ser utilizado. Ainda assim quando aferimos esses valores de remoção de matéria orgânica pode-se observar qual metal se torna mais eficiente ao processo de eletrocoagulação e também determinar as condições mais adequadas para aperfeiçoar o processo. Comparando os dois processos pode se mencionar qual dos dois se torna uma melhor alternativa para uma empresa e com isso propõe-se um sistema final que coloque o processo em sua melhor eficiência.

Esta conclusão geral pode, em função dos resultados obtidos e discutidos, ser mais bem detalhada nas seguintes conclusões parciais:

- A coagulação química quando submetida aos testes de Jarra, mostra uma boa eficiência para ambos os coagulantes analisados, tendo o sulfato de alumínio um ponto ótimo em 100 ppm na sua dosagem realizada em pH igual a 10, enquanto o cloreto férrico apresenta o ótimo na mesma dosagem apesar de o ser em pH neutro. Os dois coagulantes apresentam nesses pontos condutividades na faixa de 1000 – 1700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – a menor em questão quando se avalia a quantidade de matéria orgânica removida, uma turbidez entre 4 e 5 NTU's que o coloca dentro das normas exigidas para ser vertido em um corpo hídrico e uma demanda química de oxigênio aproximada de 40 mg/L de O_2 que caracteriza a quantidade de matéria orgânica, bio ou não degradável, susceptíveis a oxidação presente no efluente.
- A eletrocoagulação quando realizada na presença de eletrodos de ferro, apresentou um comportamento em que a partir do aumento da presença dos íons de ferro na solução, ou seja, o aumento na “dosagem” faz com que o mesmo não produza o efeito desejado, pois origina novamente a estabilização das partículas e as mesmas ficam suspensas aumentando a turbidez e diminuindo a remoção de matéria orgânica, uma vez que as partículas coloidais não se sedimentam. Sendo assim, para esses eletrodos a remoção é eficiente

apenas no início do processo. Ainda sobre a eletrocoagulação, quando trocamos os eletrodos de ferro pelos eletrodos de alumínio, nota-se uma ilustre diferença nos resultados, visto que agora a turbidez é removida efetivamente durante o decorrer do tratamento do efluente, uma vez que o coagulante de alumínio necessita de uma maior quantidade de íons presentes no efluente, ou seja, um maior tempo para promover uma remoção de matéria coloidal mais eficiente.

- A condutividade e o pH para o eletrodo de ferro no processo de eletrocoagulação apresentou respectivamente um decaimento e uma evolução no decorrer do processo devido ao mecanismo de arraste de íons do efluente durante o processo pelos flocos de precipitados dos metais formados, e o mecanismo da geração de íons hidroxila dentro do próprio reator eletroquímico que equilibravam a acidez dos metais presentes, corroborando para uma grande vantagem frente aos eletrodos de alumínio, que apesar de também apresentarem uma diminuição na condutividade e um aumento no pH, para que o mesmo mostre sua eficiência em remoção da matéria orgânica, é necessário uma “dosagem” maior, ou seja, um maior tempo de realização do processo.

Com isso, o sistema proposto no último item desse trabalho traz a proposta de aperfeiçoar um sistema de tratamento de efluentes para uma indústria de maneira que ela possa realizar o processo de maneira econômica e ambientalmente viável, utilizando equipamentos de baixo custo e alta eficiência para o efluente pesquisado.

7. RECOMENDAÇÕES

Este trabalho de conclusão de curso dá a oportunidade para o seguimento de uma nova linha de pesquisa no Laboratório de Desenvolvimento de Processos Químicos do Instituto de Química da Universidade de Brasília. Apesar de termos alcançado o sucesso desejado com os resultados obtidos, é evidente que existem algumas novas perspectivas de trabalhos futuros a serem realizados. Seguem algumas sugestões:

- Seguimento detalhado de outros parâmetros para confirmação da efetiva remoção da matéria coloidal como carbono orgânico total, potencial zeta, demanda biológica de oxigênio e outros.
- Identificação e quantificação do material contaminante do efluente industrial para uma melhor avaliação do método de tratamento.
- Otimização das condições operativas do processo para maximizar a degradação ou a remoção dos contaminantes presentes no efluente industrial.
- Estudo econômico mais detalhado que permita obter as melhores “condições” para projetar e operar uma planta de tratamento de eletrocoagulação.

Além disto, a partir da montagem satisfatória do sistema e a demonstrada confiabilidade dos resultados, encontram-se abertas as oportunidades de começar o tratamento de outro tipo de poluentes usando o sistema desenvolvido neste trabalho de conclusão de curso.

8. REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9800: Critérios para lançamentos de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1987.
3. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011**. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementam e alteram a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 04 nov. 2015.
4. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CENTRO TECNOLÓGICO DE SANEAMENTO BÁSICO - CETESB. Licenciamento Ambiental Unificado. Sistemas de tratamento de esgoto sanitário. PROJETO, IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DA ETE - ROTEIRO DO ESTUDO. Disponível em : http://www.cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/ete_projeto_implantacao_o_peracao.pdf Acesso em 04 nov.2015
5. CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA – IV REGIÃO. Minicurso: Tratamento de efluentes industriais e domésticos. Karla Gomes de Alencar Pinto. Campinas – São Paulo. 2009. Disponível em www.crq4.org.br/downloads.php Acesso em: 05 nov.2015.
6. GROSZEK, F. A deficiência na fiscalização. **Revista Saneamento Ambiental** – nº 54, p. 16-24, nov./dez. 1998.
7. TONDOWSKI, L. O cuidado com as soluções "criativas" **Revista Saneamento Ambiental** – nº 54, p. 16-24, nov./dez. 1998.
8. LERIPIO, A. **A. Gerenciamento de resíduos**. <http://www.eps.ufsc.br/~lgqa/Coferecidos.html> Acesso em: 05 nov. 2015.
9. http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3669-efluentes-industriais#.VnMFP0orLIU Acesso em: 05 nov. 2015.
10. LINS, A. G. **Impactos ambientais em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE'S)**. 2010. **Engenharia Ambiental**. Escola Politécnica e Escola de Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Disponível em : < <http://dissertacoes.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli491.pdf> >
11. MARCIONILIO, S.M.L. de O., BARROS V.V.S., LINARES J.J.L. **Tratamento de um efluente procedente de uma estação de tratamento de águas industriais mediante coagulação química e eletrocoagulação**. Instituto de Química. Universidade de Brasília. 2014.

12. <http://www.instrutec.com.br/represen/bic/teoriazeta.html> Acesso em: 05 nov. 2015.
13. CAÑIZARES, P. et al. The pH as a key parameter in the choice between coagulation and electrocoagulation for the treatment of wastewaters. **Journal of Hazardous Materials**, v. 163, n. 1, p. 158-164, 2009a. ISSN 0304-3894. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389408009552> >.
14. CAÑIZARES, P. et al. Coagulation and Electrocoagulation of Wastes Polluted with Colloids. **Separation Science and Technology**, v. 42, n. 10, p. 2157-2175, 2007/07/01 2007. ISSN 0149-6395. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/01496390701446530> >. Acesso em: 2015/07/28.
15. CAÑIZARES, P. et al. Technical and economic comparison of conventional and electrochemical coagulation processes. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 84, n. 5, p. 702-710, 2009b. ISSN 1097-4660. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1002/jctb.2102> >.
16. JIMÉNEZ, C. et al. Electrochemical dosing of iron and aluminum in continuous processes: A key step to explain electro-coagulation processes. **Separation and Purification Technology**, v. 98, p. 102-108, 2012. ISSN 1383-5866. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586612003784> >.
17. JIMENEZ IZQUIERDO, C. **Eliminación de contaminantes de aguas residuales mediante procesos de electrocoagulación y electroflotación**. 2011. (Doctor en Ingeniería Química). Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real.
18. MARTINEZ NAVARRO, F. **Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación y coagulación convencional**. 2007. (Doctor). Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Castilla-La Mancha, Ciudad Real.
19. MARTZ, M. Effective Wastewater Treatment in the Pharmaceutical Industry. **Pharmaceutical Engineering**, v. 32, n. 6, p. 1-12, 2012. Disponível em: < http://www.ispe.org/pharmaceutical_engineering/november2012 >.
20. ZALESCHI, L. et al. Electrochemical coagulation of treated wastewaters for reuse. **Desalination and Water Treatment**, v. 51, n. 16-18, p. 3381-3388, 2013/04/01 2013. ISSN 1944-3994. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1080/19443994.2012.749192> >.
21. ZALESCHI, L. et al. A comparative study of electrocoagulation and chemical coagulation processes applied for wastewater treatment. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 11, n. 8, p. 1517-1525, 2012. Disponível em: < <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0->

[84869987539&partnerID=40&md5=a33731f0998721340f4861e393ca537e](http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.011) >.

22. ZHAO, Y. X. et al. Coagulation performance evaluation of sodium alginate used as coagulant aid with aluminum sulfate, iron chloride and titanium tetrachloride. **Desalination**, v. 299, p. 79-88, 2012. ISSN 0011-9164. Disponível em: <
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001191641200286X> >.
23. Pastor, José R., Antônio R. P. Carvalho, e Gabriel Zibordi. Tratamento Químico para Estações de Tratamento de Água. s.d. <http://www.kurita.com.br/adm/download/ETA.pdf> (acedido em 5 de Outubro de 2012).
24. Gomes, Joana Filipa Pereira da Silva, e Rui Alfredo da Rocha Boaventura. Análise e optimização do processo de coagulação/floculação química na ETAR de Barcelos. Universidade do Porto. Faculdade de Engenharia, 2002.
25. http://www.quimlab.com.br/guiadoselementos/variaveis_fisicas.htm
Acesso em: 04 nov. 2015
26. https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571605879/Nocoes_Qualidade_Agua.pdf Acesso em: 04 nov. 2015
27. <http://www.casan.com.br/menu-conteudo/index/url/ete-estacao-de-tratamento-de-esgotos-sanitarios#0> Acesso em: 04 nov. 2015
28. <http://www.casan.com.br/menu-conteudo/index/url/estacao-de-tratamento-de-agua-eta#0> Acesso em: 04 nov. 2015