



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA



ALYSSON KEVEN BRAGA

**MELHORIA DO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE
BEBIDAS EM MACEIÓ – AL.**

MACEIÓ – AL.

2020

ALYSSON KEVEN BRAGA

**MELHORIA DO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE
BEBIDAS EM MACEIÓ – AL.**

Plano de Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Alagoas como parte integrante dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Químico.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Sandra Helena
Vieira de Carvalho

Coorientador: Prof. Me. Kleber Jean
Leite dos Santos

MACEIÓ – AL.

2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

B813m Braga, Alysson Keven.

Melhoria do tratamento de efluentes de uma indústria de bebidas em Maceió-AL / Alysson Keven Braga. – 2021.

43 f. : il. color.

Orientadora: Sandra Helena Vieira de Carvalho.

Coorientador: Kleber Jean Leite dos Santos.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2020.

Bibliografia: f. 40-43.

1. Gestão de resíduos industriais. 2. Tratamento de efluentes industriais.
3. Produtos químicos – Preparo e dosagem. I. Título.

CDU: 54: 628.3

RESUMO

O objetivo de um processamento industrial é a transformação de matérias-primas em produtos de alto valor agregado. Em decorrência desse processamento, além do produto principal, são gerados outros materiais de maneira não intencional. Alguns dos quais possuem valor comercial e são totalmente indesejáveis. Estes últimos são os chamados resíduos industriais, cujo descarte deve ser feito de maneira a causar menor impacto ambiental, além de atender as legislações vigentes no país. Para manter a qualidade da água tratada, uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE), pode passar por mudanças na sua estrutura física, como também nos produtos químicos utilizados e assim viabilizar o tratamento do ponto de vista econômico e ambiental, em relação ao atendimento aos parâmetros exigidos. O presente trabalho teve por objetivo avaliar o sistema de tratamento de efluentes de uma indústria de bebidas localizado em Maceió – AL. Foram avaliados as condições operacionais de preparação e dosagem de produtos químicos, de forma a reduzir o consumo de produtos e aumentar a eficiência do sistema. O processo de tratamento na unidade industrial utiliza as etapas de clarificação (filtração, coagulação, floculação e flotação). O estudo proporcionou ótimos resultados, reduzindo de forma significativa a carga poluidora dos parâmetros avaliados: Cor em 83% e 93% de remoção de Fósforo, destacando-se também a redução dos custos operacionais em 29%. Assim, os resultados obtidos permitem discorrer que as melhorias aplicadas no preparo e dosagem dos produtos químicos e os novos parâmetros de operação ocasionaram impacto positivo na relação custo/benefício do sistema de flotação por ar dissolvido (FAD).

Palavras-chaves: tratamento de efluente industrial, preparo e dosagem, redução de custo, melhoria.

ABSTRACT

The aim of industrial processing is the transformation of raw materials into high value products. Although the processing materials (products), byproducts are generated, some of which have commercial value and are totally undesirable. These ones are called industrial wastes (sewages), which must be disposed in a way that causes less environmental impact, complying with the laws in force in the country. In order to maintain the quality of the treated water, Sewage Treatment Station (STS) may undergo changes in its physical structure, as well as the chemicals to enable the treatment from an good economic and environmental point of view to cope with required parameters. This work aims to evaluate the effluent treatment system of a beverage industry located in Maceió – AL, Brazil. The operational conditions for preparing and dosing chemicals were evaluated in order to reduce product consumption and increase the efficiency of the system. The treatment process in the industrial unit uses the clarification steps (filtration, coagulation, flocculation and flotation). The study provided excellent results, significantly reducing the pollutant load of the evaluated parameters: Color by 83% and 93% of phosphorus removal, also highlighting the reduction in operating costs by 29%. Thus, the results obtained allow us to argue that the improvements applied in the preparation and dosage of chemicals and the new operating parameters have had a positive impact on the viability if the dissolved air flotation system (DAF).

Keywords: Industrial Sewage Treatment, preparation and dosage, cost reduction, improvement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxograma do procedimento de melhoria	26
Figura 2 - Fluxograma da Estação de Tratamento de Efluentes	27
Figura 3 - Bombas dosadoras: (a) anterior ao estudo, (b) após estudo	29
Figura 4 - Sistema de preparo de produtos: (a) anterior ao estudo, (b) e após estudo	30
Figura 5 - Impelidor dos tanques de preparo dos produtos químicos: (a) anterior ao estudo, (b) após estudo	31
Figura 6 - Solução de agente floculante: (a) anterior ao estudo, (b) após estudo	31
Figura 7 - Resultado das análises de fósforo do mês de outubro/2019 e janeiro/2020	34
Figura 8 - Resultado das análises de cor do mês de outubro/2019 e janeiro/2020	35
Figura 9 - Resultado das análises de turbidez do mês de outubro/2019 e janeiro/2020	35
Figura 10 - Comparação entre o efluente na entrada no sistema FAD (a) e na saída do sistema FAD (b)	36
Figura 11 - Acompanhamento do custo operacional do sistema FAD	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de trabalhos de Mestrado e Doutorado relacionados à aplicação da flotação por ar dissolvido já realizados	20
Tabela 2 - Precitados formados durante a precipitação química do fosfato	25
Tabela 3 - Caracterização do efluente bruto	32
Tabela 4 - Resultados das análises dos parâmetros avaliados no efluente ao processo de coagulação-floculação-sedimentação	32
Tabela 5 - Porcentagem de remoção dos parâmetros analisados após <i>jar test</i>	33
Tabela 6 - Controle mensal do consumo de produtos químicos	37

LISTA DE SIGLAS

DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
ETE	Estação de tratamento de efluentes
FAD	Flotação por ar dissolvido
PAC	Policloreto de alumínio
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 Geral:	13
2.2 Específicos:.....	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Efluentes industriais	14
3.2 Caracterização dos efluentes	15
3.3 Processo de tratamento de efluentes e controle operacional	16
3.3.1 Tratamento primário de efluentes	16
3.3.2 Tratamento secundário de efluentes	16
3.3.3 Tratamento terciário de efluentes	18
3.4 Flotação por ar dissolvido (FAD)	19
3.5 Coagulação	20
3.5.1 Mistura Rápida	21
3.5.2 Agente Coagulante	21
3.6 Floculação	22
3.7 Coagulação e floculação em sistemas de flotação por ar dissolvido	23
3.8 Jar Test	23
3.9 Fósforo no efluente industrial	24
3.9 Remoção de fósforo pelo processo de coagulação-floculação	25
4 METODOLOGIA	26
4.1 Procedimento para realização dos ensaios de coagulação-floculação em unidade de jar test	27
4.2 Descrição do sistema industrial da ETE	27
4.3 Metodologia para determinação dos parâmetros físico-químicos	28
4.4 Avaliação econômica	28
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
5.1 Investigação das condições operacionais e parâmetros do sistema FAD	29
5.1.1 Padrão de dosagem dos produtos químicos	29
5.1.2 Sistema de preparo dos produtos	30
5.2 Ensaio de jar test	32
5.3 Avaliação dos resultados dos ensaios de jar test	33

5.4 Aplicação dos resultados e acompanhamento do processo	34
5.5 Avaliação econômica do sistema FAD	36
6 CONCLUSÃO.....	39
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
REFERÊNCIAS	41

1 INTRODUÇÃO

A magnitude dos problemas causados no meio urbano pela destinação inadequada dos cursos d'água, dos esgotos domésticos e das águas residuárias industriais é amplamente conhecida (FERNANDES, 2006). Desta forma, a importância do aperfeiçoamento de tecnologias para o tratamento eficaz dos efluentes sanitários e industriais é a responsável pela grande mudança nas condições de controle de poluição. Assim, ao defrontar-se com um problema de resíduo industrial, face a sua complexidade, deve-se procurar a abordagem do modo mais geral possível, para que a solução a ser adotada, tanto no caso de indústrias já instaladas, como no caso daquelas que estão sendo projetadas ou construídas, seja a mais econômica e eficiente possível para a indústria e a menos prejudicial para a população e o ecossistema em geral (BORZANI, 1975).

Segundo Borzani (1975), para que se possa ter uma visão mais ampla do problema, é conveniente conhecer, ao menos em linhas gerais, os processos de fabricação envolvidos na indústria em estudo, consultar à legislação, na forma como ela se aplica à região onde se localiza a indústria.

Uma vez avaliada a situação, o próximo passo é tentar reduzir ao mínimo possível a quantidade e a carga poluidora dos resíduos, para assim, determinar a forma de disposição final dos resíduos, com o objetivo de remover os contaminantes presentes para que seja possível a sua disposição em conformidade com a legislação e de forma que não cause impactos negativos no meio ambiente (KANAYAMA, 1999).

Com a difusão deste conceito, para cada forma de disposição final possível de ser usada em determinada situação, e de acordo com os respectivos níveis de impurezas permitidos, haverá um grau de tratamento necessário para atingir os objetivos propostos. Em alguns casos, o tratamento biológico é complementado por uma etapa terciária de tratamento ou etapa de polimento, a fim de remover Fósforo, partículas suspensas e coloidais, que geram cor e turbidez ao efluente tratado (VITERBO, 1998).

Assim, a FAD se tornou uma alternativa promissora pois, inversamente a sedimentação, é um processo que promove a ascensão das partículas no interior do reator, mediante aderência de microbolhas de gás às partículas previamente floculadas, o que as torna menos densas que a água (flutuáveis), proporcionando sua rápida remoção na parte superior da unidade de flotação (REALI, 1991).

Devido a estas vantagens, e a utilização do FAD no tratamento de efluente da indústria em estudo, e como forma de prestar contribuição neste segmento de pesquisa científica, o

presente trabalho pretende otimizar a operação de preparo e dosagem dos químicos utilizados no tratamento secundário de uma ETE de uma indústria do setor de bebidas situada na cidade de Maceió – AL, dotada de um sistema de tratamento composto por um reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), seguido por sistema de lodo ativado, decantador secundário e uma unidade FAD. Projetada para tratar uma vazão média de $1680 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$, a ETE possui etapas de coagulação e floculação, visando atender aos requisitos de lançamento de matéria orgânica e nutrientes no corpo receptor aquático Rio Jacarecica, estabelecidos pela legislação da própria companhia e a vigente no Estado de Alagoas.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral:

Melhoria da operação de preparo e dosagem dos produtos químicos utilizados no tratamento terciário de uma Estação de Tratamento de Efluentes – ETE, de uma indústria do setor de bebidas situada na cidade de Maceió – AL, visando alcançar um maior desempenho do sistema FAD na remoção de cor, turbidez, fósforo e a redução dos custos operacionais.

2.2 Específicos:

- Avaliar diferentes dosagens de coagulantes e de floculantes, através de ensaios no *Jar Test* com efluente do tratamento biológico;
- Quantificar a eficácia do tratamento, através da aplicação da razão entre a dosagem do coagulante e do floculante e o valor da turbidez depois do FAD, além da taxa de remoção de fósforo;
- Avaliar a viabilidade econômica dos coagulantes e floculantes utilizados no estudo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são abordados estudos envolvidos no tema de tratamento de efluentes industriais, as características dos efluentes, o sistema de tratamento e os parâmetros a serem avaliados em uma ETE para garantir o bom funcionamento e eficiência do sistema de tratamento. A seguir, é apresentada uma revisão da literatura sobre os aspectos fundamentais da coagulação e uma análise das principais alternativas empregadas no pós-tratamento de reatores anaeróbios associado a tanques de aeração, com destaque para aqueles envolvendo o tratamento físico-químico e flotação por ar dissolvido, quando essas alternativas são empregadas na separação de sólidos.

3.1 Efluentes industriais

A poluição gerada pelas atividades industriais e os produtos consumidos envolvidos causam danos ao meio ambiente e por consequência à saúde da população. Lançar os resíduos o mais longe possível da fonte geradora, sem se preocupar com os efeitos decorrente dessa ação, não é mais aceitável. Com as regulamentações cada vez mais restritivas, em busca de um desenvolvimento sustentável, as empresas são levadas a tomar medidas para controlar a poluição ambiental (SIMIÃO, 2011).

O potencial de poluição de águas residuais é diretamente proporcional à concentração dos seus componentes poluentes. A caracterização física, química e biológica dos efluentes, torna possível estabelecer o sistema de tratamento necessário para assegurar a viabilidade da água para reutilização ou para evitar a degradação das águas receptoras quando do descarte (GUTTERRES et al., 2013).

A indústria de bebidas é grande consumidora de água. A origem dos efluentes provém das etapas de lavagem (seja dos vasilhames, equipamentos ou da instalação em si, das tubulações e pisos), das águas de sistemas de resfriamento, das águas utilizadas diretamente no processo industrial ou incorporadas ao produto, do descarte de produtos defeituosos ou retornados do mercado e dos esgotos sanitários dos funcionários (FILHO, 2013).

Os efluentes gerados na indústria de bebidas são ricos em açúcares, possuem pH alcalino e temperatura ambiente. Apresentam elevada carga orgânica (DBO, DQO e Sólidos Totais) devido ao açúcar do xarope e dos extratos vegetais utilizados na formulação de bebidas. Entretanto, a caracterização deste efluente varia com o processo produtivo, principalmente devido à tecnologia empregada durante as etapas de fabricação das bebidas (FILHO, 2013).

3.2 Caracterização dos efluentes

Os efluentes são constituídos por componentes orgânicos e inorgânicos. A caracterização da matéria orgânica dos efluentes é de grande importância para determinar a concentração de oxigênio na água. Os microrganismos utilizam a matéria orgânica disponível e consomem o oxigênio durante o seu metabolismo, portanto são responsáveis pela remoção da matéria orgânica (SPERLING, 1995). De acordo com Leme (2010), os componentes inorgânicos são representados pelo oxigênio dissolvido, nitrogênio (nas formas de nitrito e nitrato), nas formas de sais (carbonatos, bicarbonatos, fosfatos, etc.).

A demanda química de oxigênio (DQO) é também um parâmetro usado, que mede a quantidade de oxigênio equivalente para a oxidação química da matéria orgânica, por meio de um agente oxidante em meio ácido. (SANT'ANNA JUNIOR, 2010).

Os processos de tratamento biológico de efluentes são elaborados de forma a acelerar os mecanismos de degradação biológica que ocorrem naturalmente nos corpos receptores. Entretanto, a decomposição dos poluentes orgânicos biodegradáveis é alcançada, em condições controladas, em intervalos de tempo menores e mais definidos do que nos sistemas naturais, fazendo-os uso de reações bioquímicas realizadas por microrganismos. Uma grande variedade de microrganismos toma parte no processo: bactérias, algas, protozoários, fungos e outros. (SPERLING, 1995).

Segundo Jordão e Pessoa (1995), a matéria sólida presente no efluente é classificada em função de inúmeros fatores ocorridos no processo de tratamento, sua disposição na água residuária impede a passagem de luz, dificultando, assim, a fotossíntese. Sperling (1995) determina que os sólidos em suspensão sejam divididos em:

- Sólidos Totais: material que permanece na cápsula após evaporação parcial da amostra e posterior secagem em estufa à temperatura de aproximadamente 105 °C, até massa constante. Sua concentração pode variar entre 700 a 1300 mg.L⁻¹. Estes, por sua vez, podem ser classificados como sólidos em suspensão e sólidos filtráveis.
- Sólidos em Suspensão: podendo, também, ser classificados como voláteis e fixos, estes permitem verificar a eficiência de remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis. A concentração média desses varia em torno de 400 mg.L⁻¹.
- Sólidos Dissolvidos: o teor de sólidos dissolvidos representa a quantidade de substâncias diluídas na água que alteram as propriedades físicas e químicas da mesma. Em águas naturais a presença de íons: sódio, cloreto, magnésio, potássio, sulfatos, etc., se deve à dissolução de minerais.

Outras importantes características físicas incluem a distribuição de tamanho de partícula, turbidez, cor e temperatura. Odor, algumas vezes, também é considerado um fator físico (TCHOBANOGLIOUS, 2003).

3.3 Processo de tratamento de efluentes e controle operacional

Com um modelo de desenvolvimento baseado na produtividade e no consumo, e os novos materiais e tecnologias de produção em massa, a indústria vem disponibilizando à sociedade uma maior oferta de produtos. Aliado a apelos econômicos e de marketing, cria-se uma “sociedade do consumo”, aumentando significativamente o volume de resíduos e seus impactos no meio ambiente (SANTOS, 2005).

3.3.1 Tratamento primário de efluentes

O tratamento de efluentes industriais envolve processos necessários à remoção de impurezas geradas na fabricação de produtos de interesse. Os métodos de tratamento estão diretamente associados ao tipo de efluente gerado, ao controle operacional da indústria e às características da água utilizada (FREIRE et al., 2000).

São os processos que basicamente removem os sólidos em suspensão sedimentáveis e flutuantes através de processos físicos, tais como: gradeamento, peneiramento, separação de óleos e gorduras (GIORDANO, 2004). Porém, quando o efluente a ser tratado apresenta partículas finas (suspensões coloidais) que apresentam grande estabilidade devido a sua pequena dimensão e a existência de cargas superficiais que promovem a sua repulsão, os métodos físicos de separação somente não são efetivos. Um dos métodos utilizados para desestabilizar essas suspensões é a coagulação através da adição de produtos químicos (SCHOENHALS, 2006).

3.3.2 Tratamento secundário de efluentes

Os processos de tratamento biológico de efluentes são elaborados de forma a acelerar os mecanismos de degradação biológica que ocorrem naturalmente nos corpos receptores. Entretanto, a decomposição dos poluentes orgânicos biodegradáveis é alcançada, em condições controladas, em intervalos de tempo menores e mais definidos do que nos sistemas naturais, fazendo-se uso de reações bioquímicas realizadas por microrganismos (SPERLING, 1995).

Segundo Sperling (1995), uma grande variedade de métodos de tratamento biológico, sendo que os mais comuns são:

- Lagoa de estabilização e variantes;
- Reatores anaeróbios;
- Lodos ativados e variantes;
- Reatores aeróbios com biofilme.

3.3.2.1 Modelo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*)

Reator UASB, ou reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo são as formas mais eficientes atualmente no processo de degradação biológica. A concentração de biomassa no reator é bastante elevada, justificando a denominação de manta de lodo, por isso, o tempo de retenção hidráulica é pequeno, sendo o sistema mais adequado na degradação biológica de resíduos líquidos, como resíduos agroindustriais e tratamento de esgoto. Devido a esta elevada concentração, o volume requerido para reatores anaeróbios de manta de lodo é bastante reduzido em comparação com outros sistemas de tratamento. Neste reator, o gás metano gerado é recolhido na parte superior, podendo ser utilizado no reaproveitamento energético com a sua queima (CHERNICHARO, 2008).

Segundo Sperling (2002), o reator do tipo UASB pode ser utilizado no tratamento de efluentes, domésticos e industriais, com teor de carga orgânica elevada. As principais reações bioquímicas que ocorrem no processo de reação anaeróbia dentro do reator podem ser divididas em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

A digestão anaeróbia não elimina substâncias indesejadas no efluente, como a presença de microrganismo patogênicos e nutrientes. O objetivo inicial do reator é a remoção da matéria orgânica utilizando reatores como pré-tratamento, após a biomassa digerida pode-se utilizar também o tratamento complementar em sistemas convencionais como sistema de lodo ativado. Esses sistemas integrados podem fornecer um efluente adequado, a um custo menor do que os sistemas convencionais (CHERNICHARO, 1997).

3.3.2.2 Sistemas de tratamento por lodos ativados

A aeração artificial pode ser obtida pelo insuflamento de ar comprimido no interior do tanque de aeração ou pela agitação da superfície por meio de aeradores flutuantes. A ação dos dispositivos de aeração consiste em dissolver, no interior do líquido, o oxigênio do ar

atmosférico, e em manter a massa abaixo da aeração em constante agitação, de forma a obter a homogeneização de seu conteúdo e de impedir que partículas em suspensão se depositem no fundo do tanque de aeração (GIORDANO, 2004). Segundo Von Sperling (2002), unidades de tratamento denominadas tanques de aeração servem, essencialmente para submeter efluentes brutos ou pré-tratados, o que consiste no tratamento de lodos ativados.

Os efluentes brutos ou pré-tratados contêm microrganismos em concentração relativamente baixa, e matéria orgânica abundante. Estes microrganismos, ao ingressarem no tanque de aeração, encontram condições ambientais extremamente propícias para seu desenvolvimento: há alimento em abundância (matéria orgânica) e concentração de oxigênio dissolvido adequada (suprido pela aeração artificial) (VON SPERLING, 2002).

Estas duas condições, aliadas à presença de nutrientes básicos (nitrogênio e fósforo) e outros fatores ambientais, como temperatura e pH adequados, permite que estes organismos se reproduzam rapidamente, agrupando-se em colônias que permanecem em suspensão devido à turbulência causada pelos dispositivos de aeração. Tais colônias formam os chamados flocos de lodo ativado (VON SPERLING, 2002). De acordo com Baur (2012), à mistura dos flocos bacterianos e efluente denomina-se “licor”. Este licor é enviado continuamente a um decantador secundário, destinado a separar o efluente tratado do lodo.

3.3.3 Tratamento terciário de efluentes

O efluente de reatores anaeróbios requer tratamento complementar, segundo constatado por Campos et al (1996) e Oliva (1997). Segundo Campos et al (1996), apesar de o efluente dos reatores anaeróbios necessitar de pós-tratamento, a combinação anaeróbio-aeróbio ou anaeróbio-químico ainda resulta em concepções mais vantajosas do que aquelas que se fundamentam essencialmente no processo aeróbio.

Empregando o pós-tratamento físico-químico por flotação dos efluentes resultantes da combinação anaeróbio-aeróbio apresentam resultados surpreendentemente positivos em relação ao desempenho da associação sequencial com unidades de flotação por ar dissolvido (CAMPOS et al., 1996).

Lundgren (1970), afirma que os aperfeiçoamentos dos projetos de unidades de flotação e o desenvolvimento de auxiliares de coagulação altamente eficientes ampliaram o campo de aplicação do processo de flotação.

3.4 Flotação por ar dissolvido (FAD)

A aplicação industrial de bolhas para flotar pequenas partículas presentes na água, teve origem no século passado, nas indústrias de processamento de minérios. O uso da flotação em outras atividades industriais era muito pequeno até por volta de 1960, quando a FAD, que já havia sido utilizada com êxito em indústrias de papel, foi empregada no tratamento de água e de águas residuárias. A partir de então, a FAD apresentou um crescente desenvolvimento como processo e em suas aplicações (IVES, 1984).

Segundo Penetra (1998), atualmente a FAD é uma técnica de separação de fases conhecida e utilizada no campo de saneamento ambiente, abrangendo vários tipos de aplicação. Os diferentes tipos de tratamentos nos quais a FAD é utilizada:

- Águas naturais superficiais, para consumo humano ou industrial;
- Certos efluentes industriais: como águas residuárias de refinarias de petróleo indústrias de papel e celulose, de graxas e detergentes, de matadouros, de tintas, mecânicas e alimentícias, visando o tratamento ou a recuperação de produtos valorizados;
- Esgotos sanitários;
- Lodos provenientes de tratamentos diversos, visando seu espessamento.

O Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP vem estudando o tratamento físico-químico por flotação por ar dissolvido, sendo que diversos trabalhos relativos ao tema já foram publicados em revistas, jornais e periódicos especializados em todo o mundo. Durante estes anos alguns estudos em nível de mestrados e doutorado foram realizados, os quais são apresentados na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Lista de trabalhos relacionados à aplicação da flotação por ar dissolvido já realizados.

Autor (a)	Tipo	Aplicação
PENETRA, R. G. (1998)	Dissertação de Mestrado	Pós-tratamento físico-químico de efluentes de reatores anaeróbios de manta de lodo.
PENETRA, R. G. (2003)	Tese de Doutorado	Flotação aplicada ao pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio de leito expandido tratando esgoto sanitário.
SANTOS, H. R. (2006)	Tese de Doutorado	Coagulação e precipitação de efluente de reator anaeróbio e de efluente de lodos ativados precedido de reator UASB, com separação por sedimentação ou FAD.
SCHOENHALS, M. (2006)	Dissertação de Mestrado	Avaliação da eficiência do processo de flotação aplicado ao tratamento primário de efluentes de abatedouro avícola.
OLIVEIRA, A. L. (2007)	Tese de Doutorado	Floto-filtração como pós-tratamento do efluente de reator anaeróbio tratando esgoto sanitário.
SANTOS, H. R. (2008)	Dissertação de Mestrado	Emprego de polímeros em unidade de floto-filtração como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios de leito expansível tratando esgoto sanitário.

Fonte: Autor, 2019.

3.5 Coagulação

Segundo Di Bernardo (1993), a coagulação é resultado de dois fenômenos: o primeiro essencialmente químico e o segundo fundamentalmente físico. O fenômeno essencialmente químico consiste nas reações do coagulante com a água e na formação de espécies hidrolisadas com carga positiva e depende da concentração do metal e do pH final da mistura. O fundamentalmente físico consiste no transporte das espécies hidrolisadas para que haja a contato com as impurezas da água.

As partículas coloidais que conferem turbidez e cor, principalmente em águas naturais, são carregadas com íons negativos. A desestabilização por meio da adição de produtos químicos adequados na água provoca a aglomeração das partículas para posterior remoção por meio de sedimentação, flotação ou filtração (CARDOSO, 2003).

Segundo Azevedo Netto (1976), coagular significa reduzir o potencial zeta a tal ponto que se consiga a união das partículas coloidais produzindo flocos. Alguns passos são necessários para se obter a coagulação-floculação tais como:

- Redução do potencial zeta;
- Fornecimento de energia para provocar agitação que acarrete maior número de choques;
- Adição de produtos químicos que auxiliem na formação de aglomerados de partículas.

3.5.1 Mistura Rápida

A mistura rápida é uma mistura do coagulante com o efluente a ser tratado. Esse processo ocorre sob forte agitação e altos gradientes de velocidade e é muito rápido, variando de décimos de segundo até cerca de 100 s, dependendo das características do efluente, como pH, temperatura, quantidade de impurezas, etc. (SCHOENHALS, 2006).

A eficiência da coagulação depende muito do sucesso do processo de mistura rápida (KAWAMURA, 1997), pois a coagulação está relacionada com a formação dos primeiros complexos de cátions metálicos hidrolisados, esta reação de hidrólise é muito rápida e, para haver a desestabilização dos coloides, é indispensável à dispersão de alguns gramas de coagulantes sobre toda a massa de água em um tempo muito curto, o que implica na necessidade de aplicá-lo em uma região de grande turbulência proporcionando uma distribuição equânime e uniforme do coagulante à água (AZEVEDO NETTO et al., 1991)

3.5.2 Agente Coagulante

Os coagulantes podem ser classificados em polieletrólitos ou auxiliares de coagulação e coagulante metálicos (LEME, 1990). Os coagulantes mais empregados são os inorgânicos (sais de alumínio e ferro), como por exemplo, o sulfato de alumínio, o cloreto férrico e o sulfato férrico. A diferença entre coagulantes metálicos e os polímeros catiônicos está na sua reação hidrolítica com a água. Nos polieletrólitos, as cadeias polimerizadas já estão formadas quando eles são adicionados no meio líquido. Nos coagulantes metálicos, a polimerização se inicia no contato com o meio líquido, vindo a seguir a etapa de adsorção dos coloides existentes no meio (PHILIPPI, 2001).

Um dos agentes coagulantes mais utilizados é o PAC, um sal de alumínio prepolimerizado, de fórmula bruta $Al_n(OH)_nCl_{3n-m}$ na qual a relação $m/3n.100$ representa a basicidade do produto. Em função dessa basicidade, o hidroxidocloreto de alumínio, durante a

hidrolise, libera, em igualdade de dosagem de íons metálicos, uma quantidade de ácido consideravelmente menor do cloreto de alumínio e dos coagulantes tradicionais como sulfato de alumínio e cloreto férrico. Isso provoca uma menor variação do pH do meio tratado ou um menor consumo de neutralizante para reconduzir o pH ao seu valor original (SCHOENHALS, 2006).

3.6 Floculação

O fenômeno da floculação é o processo pelo qual as partículas em estado de equilíbrio eletrostaticamente instável no seio da massa líquida são forçadas e se movimentam a fim de que sejam atraídas entre si, formando flocos. Com a continuidade de agitação, estes flocos tendem a aderir uns aos outros (AZEVEDO NETTO, 1979).

Relações complexas existem entre os numerosos fatores que afetam o fenômeno da floculação. Estes fatores podem ser: o sistema químico, incluindo o tipo e concentração dos coagulantes, pH, alcalinidade, tipo e concentração de íons no meio líquido; heterogeneidade de uma suspensão em relação ao tipo, tamanho e fração de volume de partículas; e o tipo de reator incluindo o grau de mistura e variação na escala e intensidade da turbulência (AYOUB, 1996).

O pH de floculação do meio líquido é muito importante. Um pH entre 6 e 7, está numa variação efetiva para floculação com alumínio, mas sais de ferro como cloreto férrico e sulfato férrico fornecem uma variação muito grande de pH para a formação dos flocos. Deve ser notado que a variação do pH ótimo depende dos tipos de sólidos suspensos e da temperatura do meio líquido, especialmente na floculação com alumínio (MCCONHACHIE et al., 1999).

Os polímeros ou polieletrólitos são constituídos de monômeros simples que são polimerizados às substâncias de alto peso molecular com pesos moleculares variando de 10^4 a 10^6 (METCALF e EDDY, 1995). Os polímeros podem variar no peso molecular, estrutura, intensidade de carga, tipo de carga e composição. A intensidade da carga depende do grau de ionização dos grupos funcionais, o grau de co-polimerização e/ou da quantidade de grupos substituídos na estrutura do polímero (WAKEMAN e TARLETON, 1999).

Os polímeros de peso molecular alto têm cadeias muito longas e por isso são capazes de estabelecer ligações entre partículas diminutas dispersas na água, facilitando sua aglutinação e as transformando, conseqüentemente em partículas relativamente grandes. Para que a aglutinação de partículas suspensas na água se verifique é necessário que a molécula do polímero seja adsorvida nas superfícies de duas ou mais destas partículas. Para tanto, são fundamentais a carga, o peso molecular e o grupo funcional do polímero. A carga do polímero

serve para neutralizar as cargas da matéria em suspensão na água e o grupo funcional, quanto mais atuante, mais facilitará a adsorção das partículas ao polímero (SANTOS FILHO, 1973).

Adicionando-se um excesso de polímero catiônico a uma água a ser clarificada, as partículas suspensas irão adquirir cargas positivas e permanecerão dispersas no seio da água. Isso se constitui o que se chama reversão de carga da matéria em suspensão, pois de negativas que eram tornaram-se positivas. A seguir neutraliza-se com cuidado o excesso de cargas positivas usando-se um polímero aniônico. Aqui notar-se-á a aglutinação das partículas e a consequente clarificação da água (DI BERNARDO, 1993).

3.7 Coagulação e floculação em sistemas de flotação por ar dissolvido

Segundo Zabel (1984), no tratamento de água em geral o pH de coagulação deve ser otimizado para que se obtenha eficiente clarificação do efluente, o que pode ser feito através de adição de um ácido ou de uma base. A recomendação também é válida para os sistemas de flotação por dissolvido. As condições de dosagem ótima de coagulante podem ser determinadas em equipamentos de flotação em escala de laboratório e verificados em escala real, uma vez que o tempo de detenção hidráulica nos sistemas de FAD são relativamente curtos (aproximadamente uma hora). Ainda mais que a dosagem de coagulante são as condições de agitação e manutenção de valor de pH de coagulação adequado.

Quanto à floculação antecedendo a flotação, a agitação fornecida deve ser suficiente para promover a colisão das partículas primárias visando o crescimento do floco. As unidades de floculação são constituídas, geralmente, por dois ou mais tanques de volumes iguais associados a equipamentos de agitação lenta. O tempo de floculação depende das características do efluente, mas, em geral, assume valores entre 12 a 20 min. Além disso, o grau de agitação também é muito importante e é denominado gradiente médio de velocidade de floculação (ZABEL, 1984).

3.8 Jar Test

A dosagem do coagulante e auxiliar floculante necessária para o tratamento de um efluente é de difícil determinação de forma analítica, pois existem complexas inter-relações entre o coagulante químico e os diversos componentes presentes nos efluente a serem tratados, entre eles fatores como o pH, temperatura, intensidade e duração da mistura. Para tanto, equipamentos conhecidos como *Jar Test* são utilizados para obter a dosagem mais eficiente e

econômica de coagulantes para um determinada intensidade e duração da mistura (SCHOENHALS, 2006).

Esse ensaio também é bastante utilizado em laboratório para determinar parâmetros básicos fundamentais na elaboração de projetos de estações de tratamento de água. É através dos testes de jarros em laboratório que se obtém o tempo e a agitação necessária à condição ótima de coagulação/floculação de um efluente. Uma vez determinada a dosagem ótima dos coagulantes, verifica-se o tempo e o gradiente de velocidade ótimo para se flocular o efluente em estudo. A floculação obtida deve apresentar uma boa porcentagem no decaimento da turbidez após a decantação (AZEVEDO NETTO et al., 1976).

Segundo Mendes (1989), para cada tempo de floculação existe um gradiente de velocidade ótimo, com o qual se obtém a maior eficiência de remoção de flocos por sedimentação (DI BERNARDO et al., 1993).

3.9 Fósforo no efluente industrial

Segundo Esteves (1988), a importância do fósforo nos sistemas biológicos deve-se a sua participação em processos fundamentais dos seres vivos, tais como: armazenamento de energia (forma uma fração essencial da molécula de ATP) e estruturação da membrana celular (através de fosfolipídeos). O fósforo é o principal fator limitante da produtividade da maioria das águas continentais e tem sido apontado como o principal responsável pela eutrofização artificial destes ecossistemas.

Estudos determinaram que a maior parte do fósforo despejado (50 a 80% está contido nos sólidos suspensos). Assim, um mecanismo que possa remover uma grande quantidade de sólidos suspensos irá contribuir para redução do nível global de fósforo (EBLING et al., 2003).

Segundo Aguilar et al. (2002), no processo de coagulação/floculação, a remoção de fósforo na água residuária pode ser devida a:

- Os fosfatos existentes estão incorporados aos sólidos suspensos e a redução desses sólidos durante o processo inclui a redução de fosfatos;
- A adsorção direta dos íons de fosfatos nos produtos de hidrólise formados pelo íon metálico utilizado como coagulante;
- Remoção através da formação de fosfatos precipitados com os sais metálicos utilizados como coagulantes.

Os fatores que afetam a escolha de determinado produto químico visando a remoção de fósforo são: concentração de fósforo afluyente, concentração de sólidos suspensos na água residuária, alcalinidade, custos do produto químico (inclusive o transporte), fornecimento garantido do produto, unidades para manipulação do lodo, meios adequados para disposição final e compatibilidade com outros processos. (METCALF e EDDY, 1991).

3.9 Remoção de fósforo pelo processo de coagulação-floculação

A remoção do fosfato das águas residuárias envolve a incorporação do fosfato em uma forma particulada (sólidos suspensos) e, na sequência a remoção dos sólidos suspensos. Os tipos de sólidos suspensos nos quais os fosfatos podem ser incorporados são biológicos (microrganismos) ou químicos (fosfatos de metal precipitados pouco solúveis). A precipitação química do fosfato é necessária quando os limites de emissão de fósforo são menores que aqueles alcançados pelo tratamento biológico. A precipitação do fosfato é conseguida pela adição de um metal, o que acarreta a formação dos fosfatos precipitados pouco solúveis. Este metal pode ser o cálcio (Ca^{2+}), o ferro (Fe^{2+} ou Fe^{3+}) ou o alumínio (Al^{3+}). O conhecimento da natureza dos fosfatos formados pela adição destes precipitantes às águas residuárias, de sua solubilidade e de suas variações de solubilidade de acordo com as condições da solução é essencial para a previsão e o controle dos resultados da remoção química de fosfato. Uma lista de alguns sólidos que podem ser formados é apresentada na **Tabela 2** (JENKINS & HEMANOWICZ, 1991).

Tabela 2 - Precitados formados durante a precipitação química do fosfato

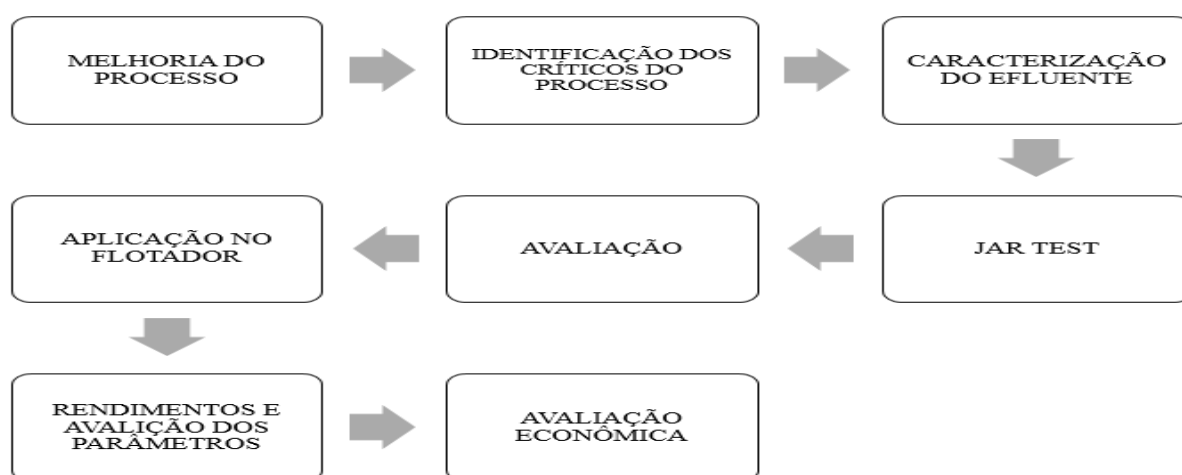
METAL	PRECIPITADO	pH	COMENTÁRIO
Ca^{2+}	Vários fosfatos de cálcio, ex.: Fosfato de β -tricálcio: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (s) Hidroxiapatita: $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ (s) Fosfato de dicálcio: CaHPO_4 (s)	≥ 10	Produz as menores concentrações residuais de P. A alcalinidade da água determina a dosagem por causa da formação de CaCO_3 .
	Carbonato de cálcio: CaCO_3	$\geq 9,5$	P residual entre 1 e 2 mg/L
Fe^{2+}	Fosfato ferroso: $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)$ (s)	6 – 8,5	Há alguma oxidação de Fe^{2+} a Fe^{3+} .
	Fosfato férrico: $\text{Fe}_x(\text{OH})_y(\text{PO}_4)_z$ (s)		
	Hidróxido ferroso: $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (s)		
	Hidróxido férrico: $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (s)		
Fe^{3+}	Fosfato férrico: $\text{Fe}_x(\text{OH})_y(\text{PO}_4)_z$ (s)	6 – 8,5	
	Hidróxido férrico: $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (s)		
Al^{3+}	Fosfato de alumínio: $\text{Al}_x(\text{OH})_y(\text{PO}_4)_z$ (s)	6 – 8,5	
	Hidróxido de alumínio: $\text{Al}(\text{OH})_3$ (s)		

Fonte: Jenkins & Hemanowicz (1991) e Droste (1997).

4 METODOLOGIA

O estudo foi realizado em uma indústria do ramo de bebidas, que se localiza na cidade de Maceió – AL. Esta dispõe de uma ETE, em operação com sistema de tratamento anaeróbio e lodo ativado, seguido por FAD. Foi realizado um levantamento de dados sobre os parâmetros físico-químicos e condições operacionais do FAD.

Figura 1- Fluxograma do procedimento de melhoria



Fonte: Autor, 2019.

O procedimento inicial constitui do acompanhamento diário da equipe técnica e responsáveis pela ETE em estudo, a fim de identificar e analisar possíveis pontos de melhoria na estrutura do sistema FAD e no processo de preparo e dosagem dos produtos químicos utilizados.

Por se tratar de um sistema dinâmico, as características físico-químicas do efluente bruto e tratado variam ao longo do dia. Para minimizar o efeito dessas variações e obter certa reprodutibilidade nas características dos efluentes estudados, foi adotado um procedimento padrão de coleta e armazenamento das amostras utilizadas nos ensaios de coagulação-floculação. De acordo com esse procedimento, as coletas de amostras do efluente foram realizadas nos mesmos horários, sempre entre segunda e sexta-feira. As amostras foram coletadas na entrada do sistema FAD em intervalos de 4 horas, durante todo o dia.

Durante a coleta das amostras foi realizada a medição do pH e temperatura, sendo, imediatamente encaminhadas para o laboratório da empresa para a caracterização inicial do efluente: cor, turbidez e fósforo.

Os procedimentos adotados durante a realização dos ensaios de coagulação-floculação nas unidades de bancada são descritos a seguir.

4.1 Procedimento para realização dos ensaios de coagulação-floculação em unidade de *jar test*

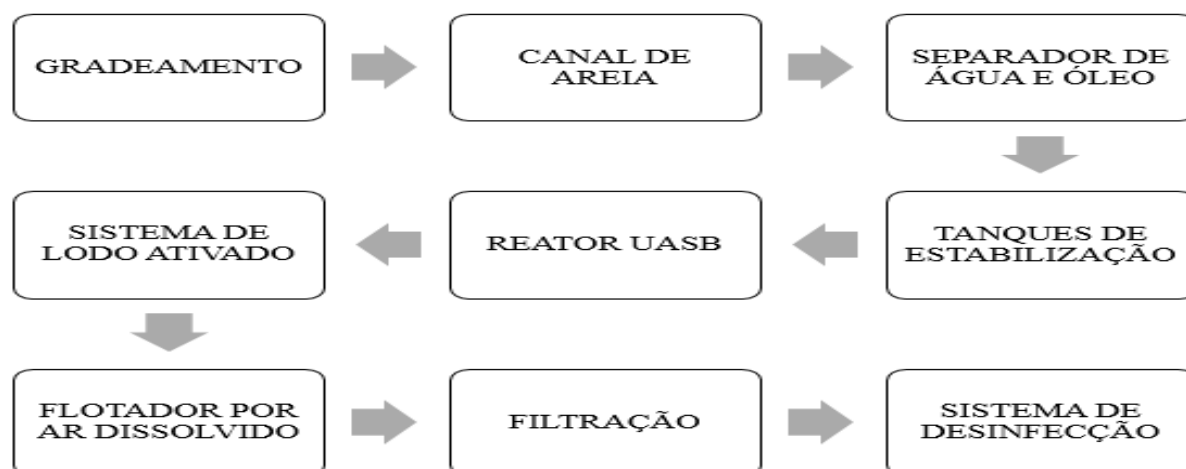
O equipamento *jar test* propicia a dosagem simultânea dos coagulantes nas seis cubetas, além de indicar a velocidade angular (rotações por minuto), permitindo o ajuste de velocidade e coleta das amostras.

Para os ensaios de coagulação-floculação, foi utilizado 1,5 L para cada uma das 6 (seis) cubetas, sendo feito o ajuste da velocidade referente à mistura rápida (200 ± 5 rpm). Em seguida, o pH do efluente foi corrigido para a faixa de operação do agente coagulante Policloreto de alumínio (PAC) indicada pelo fornecedor entre: 6,5 – 7,5. Para os ensaios foi fixada a dosagem de polímero aniônico (5% e dosagem de 5 ppm). Foram dosados 100 ppm do PAC, utilizando diferentes concentrações, de forma a variar o volume de produto. Decorrido o tempo de mistura rápida de 2 minutos, a velocidade de mistura foi ajustada em 50 ± 5 rpm durante 20 (vinte) minutos. Após este tempo, o equipamento foi desligado. As amostras do líquido clarificado foram coletadas após 30 minutos. Foram determinados os parâmetros cor, turbidez, pH e fósforo.

4.2 Descrição do sistema industrial da ETE

Nesta etapa, foi realizada uma vistoria nos equipamentos e instrumentos da ETE, que opera em sistema contínuo.

Figura 3 - Fluxograma da Estação de Tratamento de Efluentes



Fonte: Autor, 2019.

4.3 Metodologia para determinação dos parâmetros físico-químicos

Todas as determinações dos parâmetros físicos, químico foram realizadas de acordo com o *Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1995). Os parâmetros a serem avaliados, são os seguintes: Cor, Turbidez, Potencial Hidrogeniônico (pH) e Fósforo Total.

4.4 Avaliação econômica

Foi feito um levantamento do custo operacional do tratamento terciário, em relação aos produtos químicos utilizados antes e depois do estudo, a fim da redução dos custos operacionais, utilizando o histórico de gastos da ETE.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados como resultados a avaliação da eficiência do sistema FAD, incluindo os resultados obtidos nos ensaios de coagulação-floculação com o efluente da ETE.

5.1 Investigação das condições operacionais e parâmetros do sistema FAD

Objetivando-se alcançar um maior desempenho do sistema FAD na remoção de cor, turbidez, fósforo e obter viabilidade econômica do processo. Inicialmente foram constatadas possibilidades de melhorias relacionados ao preparo do agente coagulante e floculante, que são mostrados em seguida:

5.1.1 Padrão de dosagem dos produtos químicos

Foi constatado que as bombas dosadoras de PAC e agente floculante não possuíam automação com a vazão de efluente a ser tratado. Em conjunto com a equipe de manutenção da ETE foram realizados testes nas bombas dosadoras e algumas apresentaram falhas e em seguidas foram substituídas, como pode ser visto na **Figura 3**. Ainda com o auxílio da equipe de manutenção foi instalada a comunicação entre a vazão de dosagem dos produtos químicos com a vazão de efluente da ETE.

Figura 3 - Bombas dosadoras: (a) anterior ao estudo, (b) após estudo.



Fonte: Autor, 2019.

5.1.2 Sistema de preparo dos produtos

Foram evidenciados problemas relacionados a estocagem dos produtos, tanques de preparo em condições irregulares quanto a agitação e o tempo. Segundo Pacheco (1970), os polímeros secos são bastantes higroscópicos e devem ser estocados em local de pouca ou nenhuma umidade, sempre que possível. Quando a solução é preparada, isto é, o material é dissolvido em água, ela se torna pouco durável. Recomenda-se que não se guarde por um período maior que 24 horas.

Dessa forma, no sistema de dosagem de polieletrólitos deve-se ter pelo menos dois tanques de preparação de solução, para possibilitar uma dosagem contínua, mesmo utilizando-se sistema de preparação descontínuo (PACHECO, 1970).

A ETE em estudo só possuía um tanque de preparo para o agente floculante, e uma área de estocagem com problemas de umidade. De forma, a atender as necessidades de preparo e estocagem, o galpão de estocagem e preparo foi impermeabilizado e contemplado com um novo tanque de preparação do agente coagulante, assim garantindo o tempo necessário para o preparo do mesmo.

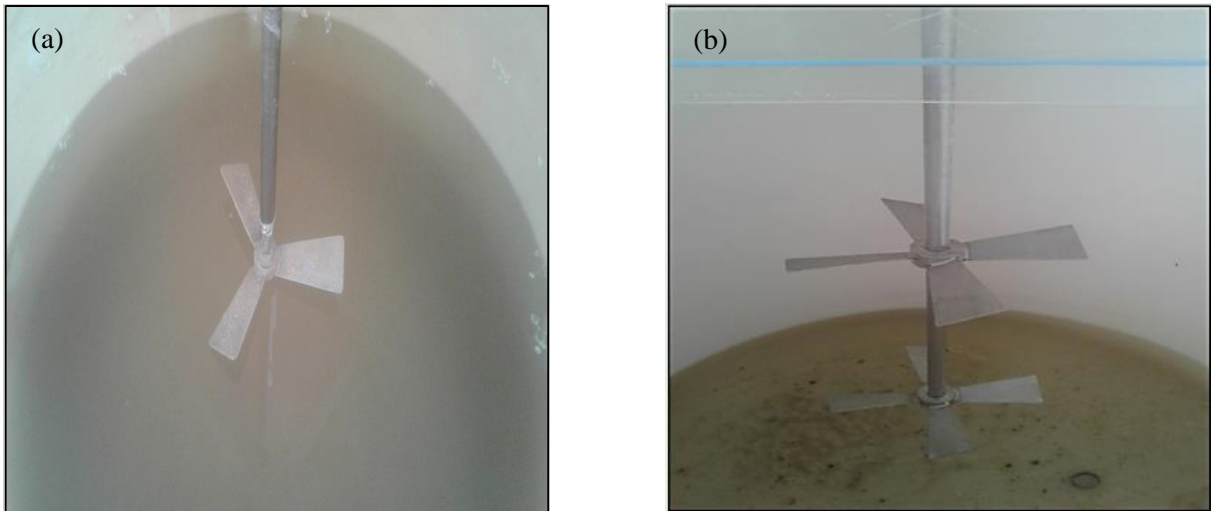
Figura 4 - Sistema de preparo de produtos: (a) anterior ao estudo, (b) e após estudo



Fonte: Autor, 2019.

No processo de agitação o misturador deverá ser de baixa rotação (máxima até 350 rpm), pois após ter-se preparado uma determinada solução a uma concentração desejada, esta deverá ser agitada continuamente no tanque de preparação durante um tempo de pelo menos 1 hora, antes de sua utilização (PACHECO, 1970).

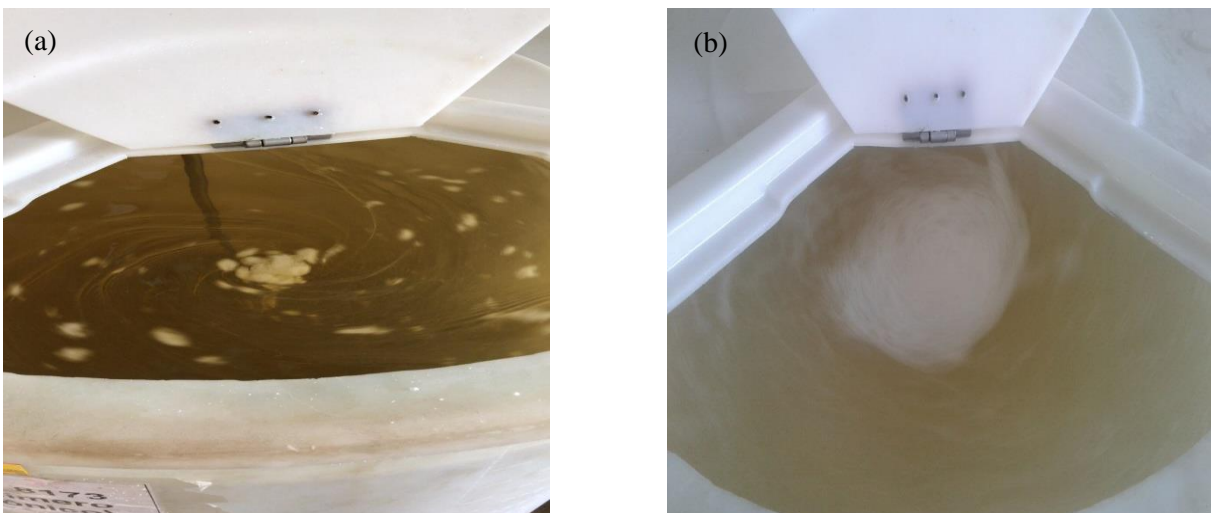
Figura 5 - Impelidor dos tanques de preparo dos produtos químicos: (a) anterior ao estudo, (b) após estudo.



Fonte: Autor, 2019.

O mecanismo de agitação dos tanques de preparo foi adequado para garantir a eficiente dissolução de polímeros secos, isto facilita o umedecimento de cada partícula de polieletrólito seco fazendo com que o mesmo entre rapidamente em solução. Assim, o processo de preparo da solução do polímero tornou-se mais eficiente reduzindo a perda de polieletrólito aniônico consideravelmente, conseqüentemente evitando o entupimento da tubulação de dosagem da solução devido a presença de massas amorfas que eram comuns no preparo antes da melhoria aplicada, como é visto na **Figura 6**.

Figura 6 - Solução de agente floculante: (a) anterior ao estudo, (b) após estudo.



Fonte: Autor, 2019.

5.2 Ensaio de *jar test*

A seguir são apresentados, na **Tabela 3**, os resumos das análises físico-químicas realizadas com o efluente coletado na entrada no sistema FAD, após os ensaios de *jar test* com a variação da concentração de PAC e a dosagem do agente floculante.

Tabela 3 - Caracterização do efluente bruto

PARÂMETRO	
TEMPERATURA (°C)	25,9
pH	7,78
COR (mg Pt Co.L ⁻¹)	206
TURBIDEZ (NTU)	905
DQO (mg.L ⁻¹)	47
FÓSFORO (mg P .L ⁻¹)	12,34
SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS (mg. L ⁻¹)	911

Fonte: Autor, 2019.

Segundo Pacheco (1970), a faixa de dosagem ótima dos polieletrólitos é bastante estreita, ao redor de 1 a 5 ppm. Portanto foi realizado um comparativo de diferentes concentrações de PAC e aplicou-se o polímero aniônico a 5% com 5 ppm de dosagem.

A fim de determinar a concentração ideal do agente coagulante, ou seja, a operação economicamente viável e que atenda os parâmetros de lançamento do efluente. Assim, o objetivo desta etapa foi avaliar o PAC com auxílio do polieletrólito quanto a efetividade na remoção de cor, turbidez e fósforo do efluente. Inicialmente, realizou-se um teste para encontrar a dosagem ideal, partindo da amostra bruta supracitada. Após o *jar test* obteve-se os seguintes mostrados na **Tabela 4**.

Tabela 4 - Resultados das análises dos parâmetros avaliados no efluente ao processo de coagulação-floculação-sedimentação

PARAMÊTROS	CONCENTRAÇÃO DE PAC				
	18%	10%	5%	3%	1,5%
TEMPERATURA (°C)	25,1	25,4	26,3	25,6	26,1
pH	6,87	6,96	6,94	7,03	7,12
COR (mg Pt Co.L ⁻¹)	29	34	69	55	74
TURBIDEZ (NTU)	0,77	0,96	1,75	1,54	1,78
DQO (mg.L ⁻¹)	45	47	46	47	47
FÓSFORO (mg P .L ⁻¹)	0,72	0,78	1,13	1,39	4,38
SÓLIDOS TOTAIS DISSOLVIDOS (mg. L ⁻¹)	831	849	894	903	910

Fonte: Autor, 2019.

Conforme NOKES e FENTON (1997), existe uma relação estequiométrica entre a carga negativa e a quantidade de coagulante necessária para a coagulação. Os coagulantes metálicos são conhecidos por ser mais eficientes na desestabilização das partículas finas suspensas, portanto optou-se pela pré-desestabilização através da coagulação, tornando mais eficiente a ação do floculante.

De acordo com os resultados obtidos nesses ensaios, para todas as concentrações de PAC utilizadas, o polieletrólito aniônico apresentou boa eficiência quantos aos índices de remoção de turbidez e avaliação da formação de flocos. De acordo com Eckenfelder Jr. (1989) os polieletrólitos aniônicos substituem os grupos aniônicos em uma partícula coloidal e permitem a ligação de hidrogênio entre o coloide e o polímero. Dessa forma, o polieletrólito aniônico via ligação eletrostática, consegue promover a neutralização de carga na partícula por causa da adsorção do polímero em sua superfície.

5.3 Avaliação dos resultados dos ensaios de *jar test*

A primeira fase dos ensaios foi a verificação do efeito do gradiente de concentração das soluções de PAC com o auxílio do polieletrólito aniônico, na turbidez, cor e fósforo. Dessa forma, a tabela 5 mostra a eficiência na remoção dos parâmetros avaliados em função da concentração de PAC. Dessa forma, é importante ressaltar que a comercialização do PAC é realizada em 18%, assim foram realizadas diluições para as outras concentrações utilizadas nos ensaios.

Tabela 5 - Porcentagem de remoção dos parâmetros analisados após *jar test*

PARAMÊTROS	REMOÇÃO				
	PAC 18%	PAC 10%	PAC 5%	PAC 3%	PAC 1,5%
COR	85,92	83,50	66,50	73,30	64,08
TURBIDEZ	99,91	99,89	99,81	99,83	99,80
FÓSFORO	94,17	93,68	90,84	88,74	64,51

Fonte: Autor, 2019.

Conforme se verifica na tabela 5, houve uma redução significativa dos parâmetros cor, turbidez e fósforo ao final do tratamento. BRASIL (2011) estabelece limites de emissão em função dos parâmetros avaliados nesse estudo, de até 5 ppm para Fósforo, não visível para cor e turbidez abaixo de 40 NTU. Sendo que o regimento da empresa tem limites de emissão mais

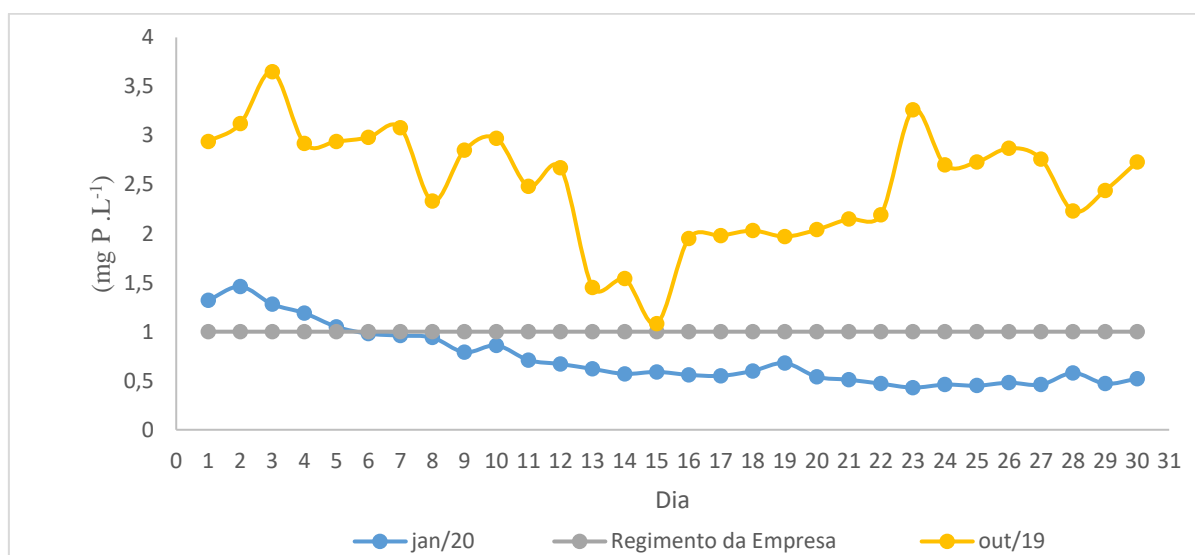
rígidos para Fósforo até 1 ppm, Cor abaixo de 100 mg Pt Co.L⁻¹. Diante disso, fica estipulada como padrão de emissão os valores estabelecidos pela empresa devido ao maior grau de criticidade.

5.4 Aplicação dos resultados e acompanhamento do processo

De acordo, com que as correções foram realizadas na estrutura física do sistema FAD e por meio dos resultados obtidos pelos ensaios de *jar test*, houve a implementação dos novos parâmetros de preparo e dosagem dos produtos químicos utilizados no sistema FAD, em que, foi determinada a concentração de PAC 10% com 100 ppm de dosagem e o polieletrólito aniônico a 5% e dosagem de 5 ppm. Dessa forma, avaliar a eficiência do tratamento no sistema FAD e minimizar os custos operacionais.

A ETE estudada manteve um registro mensal das análises de cor, turbidez e fósforo realizadas diariamente. Baseado nos gráficos mensais produzidos, pode-se comparar a variação dos parâmetros avaliados, no período em que o sistema foi ajustado. Assim, para cada mês existe o acompanhamento dos gastos envolvendo a compra e utilização de PAC e o polieletrólito aniônico. As **Figuras 7, 8 e 9**, apresentou os resultados de análises de cor e fósforo para os meses de outubro de 2019 e janeiro de 2020.

Figura 7 - Resultado das análises de fósforo do mês de outubro/2019 e janeiro/2020

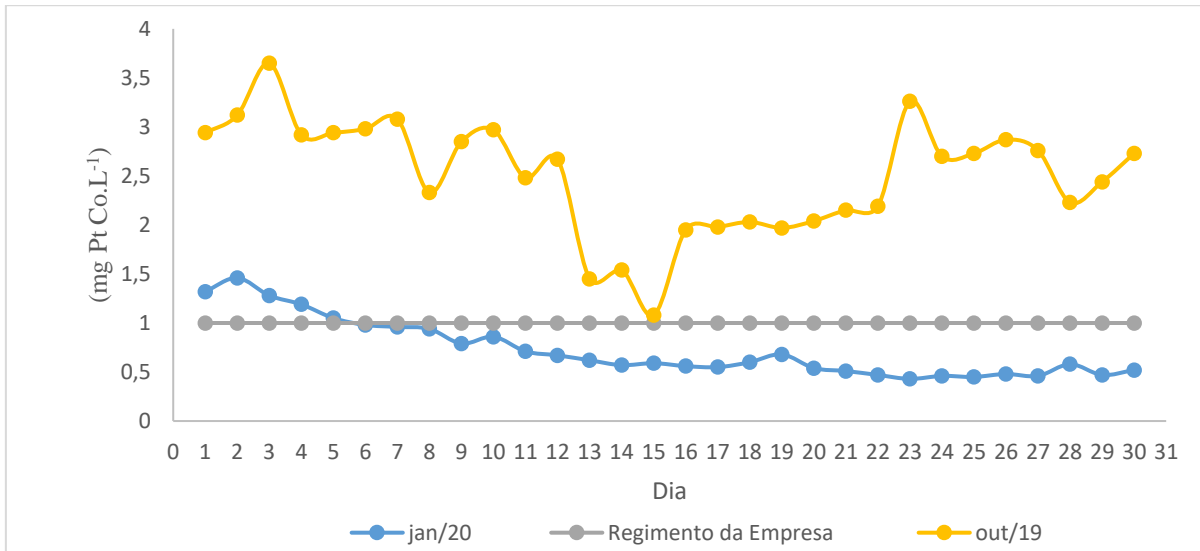


Fonte: Autor, 2020.

A concentração de fósforo no efluente ao sistema FAD foi bastante reduzida devido aos novos parâmetros de preparo e dosagem dos produtos químicos no processo de coagulação-

floculação. Devido as melhorias aplicadas, os resultados em janeiro de 2020 foram muito satisfatórios no que se refere à remoção de fósforo, atendendo a recomendação de lançamento do efluente tratado.

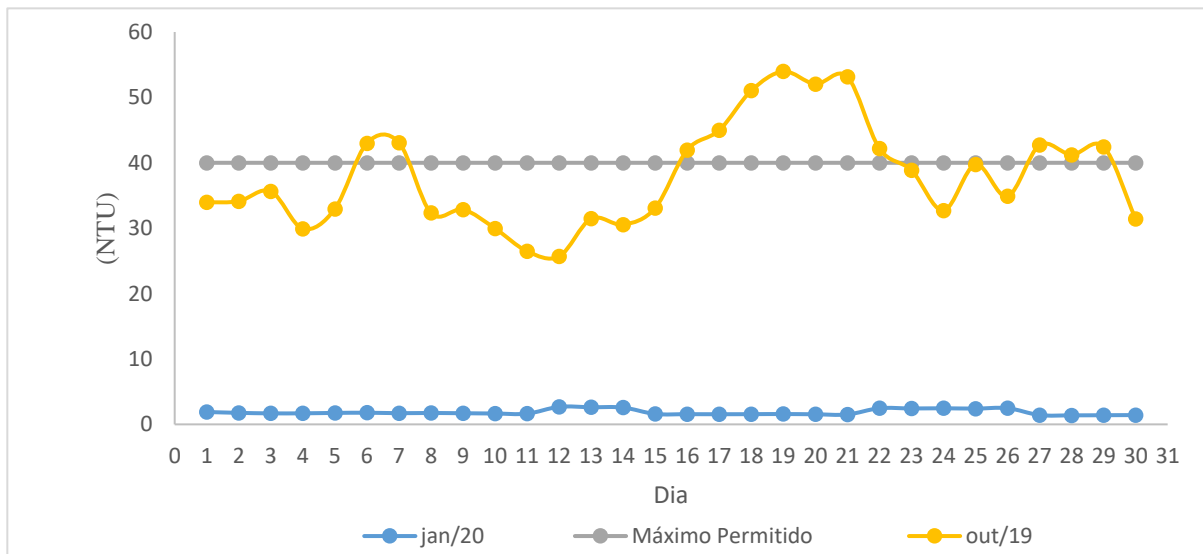
Figura 8 - Resultado das análises de cor do mês de outubro/2019 e janeiro/2020



Fonte: Autor, 2020.

Em termos de remoção de cor, os ajustes realizados na concentração de PAC e o auxílio de polieletrólito aniônico apresentaram um comportamento muito positivo. O mês de outubro de 2019 apresentou instabilidade de remoção, enquanto o mês de janeiro de 2020, seguiu com a mesma tendência em relação a redução da cor.

Figura 9 - Resultado das análises de turbidez do mês de outubro/2019 e janeiro/2020



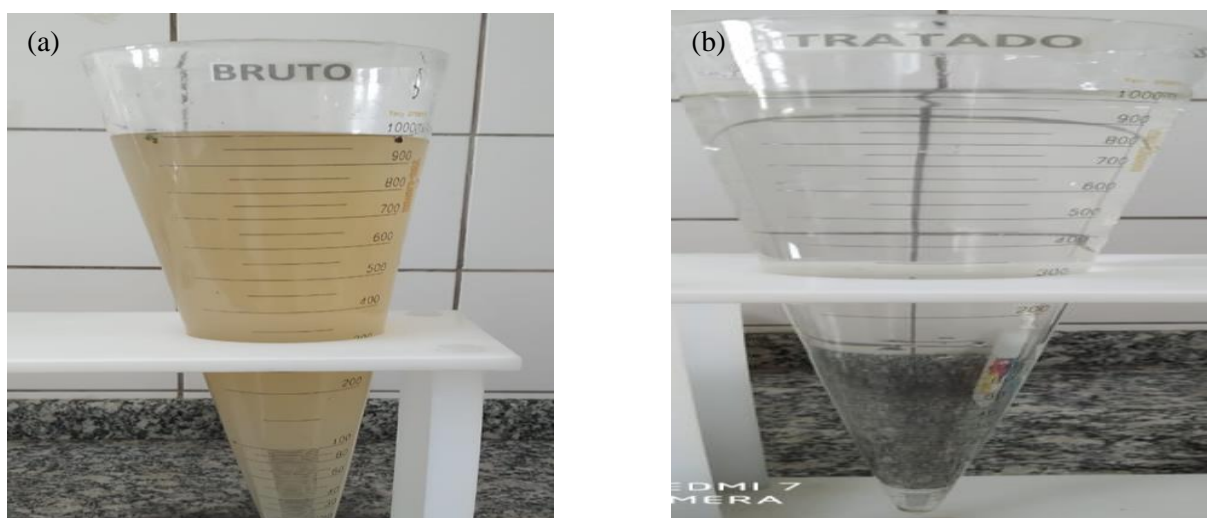
Fonte: Autor, 2020.

Conforme pode ser visualizado na **Figura 9**, as altas taxas de remoção de turbidez evidenciam que a otimização no sistema FAD foi muito positiva, indicando um aumento da eficiência e estabilidade na remoção de turbidez.

As grandes variações que ocorreram com o efluente do mesmo processo industrial, na remoção de fósforo, cor e turbidez justificam a importância da execução de jar test em determinados intervalos de tempo, de modo a garantir um desempenho adequado dos reagentes nas etapas de coagulação-floculação.

Através da **Figura 10**, com a simples análise visual das amostras, percebe-se que o tratamento por sistema FAD utilizando o PAC e o polieletrólito aniônico, foi muito efetivo na remoção de cor e turbidez, tendo apresentado resultados positivos em todos os parâmetros avaliados.

Figura 10 - Comparação entre o efluente na entrada no sistema FAD (a) e na saída do sistema FAD (b)



Fonte: Autor, 2020.

5.5 Avaliação econômica do sistema FAD

A ETE mantém um registro mensal dos gastos envolvendo todo o processo de tratamento do efluente gerado pela fábrica. Desse modo, sem comprometer a qualidade do efluente tratado, o estudo de otimização possibilitou a redução dos custos operacionais, vale ressaltar que não houve alteração de preços dos produtos químicos no período avaliado. Na **Tabela 6**, constam as quantidades e valores mensais consumidos de PAC e o polieletrólito aniônico, antes e depois das mudanças desenvolvidas.

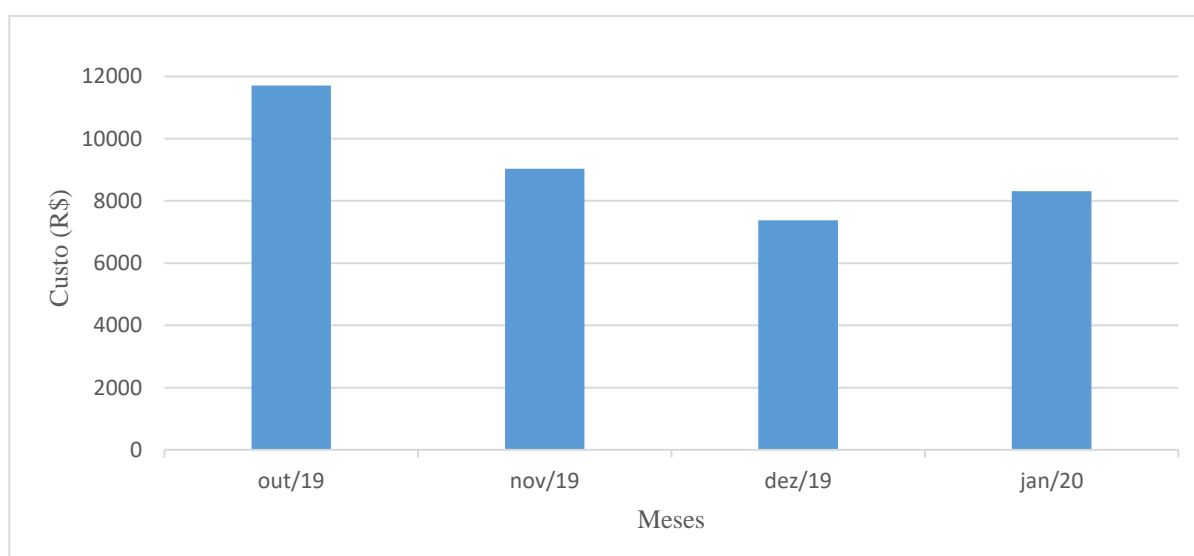
Tabela 6 - Controle mensal do consumo de produtos químicos

MÊS/ANO	PAC		POLÍMERO		OUTROS ¹	TOTAL
	CONSUMO	CUSTO	CONSUMO	CUSTO		
OUT/2019	1870 kg	R\$ 6.358,00	100 kg	R\$ 4.000,00	R\$ 1.352,00	R\$ 11.710,00
NOV/2019	1420 kg	R\$ 4.828,00	75 kg	R\$ 3.000,00	R\$ 1.209,34	R\$ 9.037,34
DEZ/2019	1080 kg	R\$ 3.672,00	60 kg	R\$ 2.400,00	R\$ 1.308,08	R\$ 7.380,08
JAN/2020	1210 kg	R\$ 4.114,00	75 kg	R\$ 3.000,00	R\$ 1.201,99	R\$ 8.315,99

1 – Gastos no processo de desinfecção, limpeza da área, água para preparo das soluções de PAC e polímero, ácido clorídrico.

Fonte: Autor, 2020.

Pode-se observar na **Tabela 6**, que o custo de tratamento de efluente oscilou bastante no período de estudo, vale ressaltar que o mês de outubro de 2019 apresenta resultados anteriores as melhorias do sistema FAD, nos meses de novembro e dezembro de 2019, o consumo dos produtos químicos foi menor devido, também a necessidade de pausar do sistema FAD para as devidas melhorias supracitadas e realização dos ajustes necessários para implementação dos novos parâmetros. O mês de janeiro de 2020 apresentou menor índice de custo operacional, com uma significativa redução dos produtos químicos, sem no entanto comprometer a qualidade do efluente tratado.

Figura 11 - Acompanhamento do custo operacional do sistema FAD

Fonte: Autor, 2020.

De acordo com o **Figura 11**, o custo operacional do sistema FAD diminuiu substancialmente com as melhorias e novos parâmetros de operação. E, comparando ao mês de outubro de 2019, que apresentou o custo operacional e janeiro de 2020 logo após as melhorias, obteve-se uma redução de 29% no custo do sistema em estudo, indicando que as mudanças foram efetivas e deram os resultados esperados.

6 CONCLUSÃO

Nas condições experimentais investigadas neste estudo, os resultados obtidos permitem concluir que, as melhorias aplicadas na estrutura física no sistema FAD conciliadas com os parâmetros e recomendações de preparo e dosagem dos produtos químicos obtidos pelos ensaios de *jar test* foram satisfatórias, de modo a oferecer uma melhor relação custo/benefício, no processo de tratamento de efluente da ETE.

Os ensaios de *jar test* com o PAC e o polieletrólito aniônico apresentaram excelentes resultados para remoção de cor, turbidez e fósforo, sendo evidente os melhores resultados para concentrações mais elevadas de PAC. A fim de se obter, também a redução dos custos operacionais, a escolha pelo PAC diluído a 10% resultou na remoção de 83% e 93% para cor e fósforo, respectivamente.

Os novos parâmetros de preparo e dosagem obtidos pelos ensaios de *jar test* contribuíram favoravelmente na eficácia e estabilidade de tratamento do sistema FAD, sendo o mês de janeiro de 2020 um forte indicativo de que as mudanças surtiram efeito, pois todos os parâmetros avaliados ficaram dentro da recomendação de lançamento do efluente tratado.

As melhorias aplicadas no preparo e dosagem dos produtos químicos, possibilitaram a redução de perdas, acarretando também a minimização dos custos pela compra dos produtos químicos. Através do resultados obtidos e melhorias aplicadas, obteve-se uma redução nos custos operacionais do sistema de 29%.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar as condições de tratamento do efluente em outras concentrações e dosagens de PAC e polímero.
- Realizar novos ensaios de coagulação-floculação com a utilização de outros produtos químicos.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, M.I.; SÁEZ, J.; LLORÉNS, M.; SOLER, A.; ORTUÑO, J. F. (2002). **Nutrient removal and sludge production in the coagulation – flocculation process**. Water Research.
- APHA, AWWA, WPCF. (1995). **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. 14th edition, New York.
- AYOUB, G.M.A. (1996). **A model for flocculation in a gravel reactor: development and assessment**. J. Water SRT – Aqua. V. 45, n.2, p. 76-83.
- AZEVEDO NETTO, J.M. (1976). **Técnicas de abastecimento e tratamento de água**. Vol.2: CETESB, São Paulo.
- AZEVEDO NETTO, J.M. **Técnicas de abastecimento e tratamento de água**. 2.ed. v.2., São Paulo: CETESB, 1979.
- AZEVEDO NETTO, J.; RICHTER, C.A. (1991). **Tratamento de água**. Tecnologia atualizada. EDGARD BLÜCHER, São Paulo.
- BAUR, L. **Estudo e identificação de nitrogênio em efluentes de curtume**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Química, UFRGS, Porto Alegre, 2012.
- CAMPOS, J. R.; REALI, M.A.P.; DOMBROSKI, S.A.G.; MARCHETTO, M. & LIMA, M.R.A. (1996). **Tratamento Físico-Químico por Flotação de Efluentes de Reatores Anaeróbios**. XXV Congresso Interamericano Ingeniería Sanitaria y Ambiental, México.
- CARDOSO, M. (2003). **Efeito do tipo de coagulante na produção de lodo de estação de tratamento de água**. Dissertação de Mestrado. Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG. 1997. 246 p.
- CHERNICHARO, C.A.L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Reatores Anaeróbios – Vol. 5**. 2008.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº 430, de 2011**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento, e dá outras providências. CONAMA, maio. 2011.
- DI BERNARDO, L. (1993). **Método e Técnicas de Tratamento de Água (Vol. 1)**. Rio de Janeiro, ABES.
- ECKENFELDER JR, W.W. **Industrial water pollution control**. Mc Graw-Hill Bok Company. 1989.
- ESTEVES, F.A. (1998). **Fundamentos de limnologia**. Rio de Janeiro, ed. Interciência Ltda. Cap.14, p.216-36: Fósforo.
- EBLLING, J. M.; SIBRELLI, P. L.; OGDEN, S. R.; SUMMERFELT, S. T. (2003). **Evaluation of chemical coagulation - flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorous from intensive recirculating aquaculture effluent discharge**. Aquacultural Engineering 29, p. 32-42.

- FERNANDES, Gracie FR; OLIVEIRA, Roberto A. de. **Desempenho de processo anaeróbio em dois estágios (reator compartimentado seguido de reator UASB) para tratamento de águas residuárias de suinocultura.** Engenharia Agrícola, p. 243-256, 2006.
- FREIRE, R.S.; PELEDRINI, R.; KUBOTA, I.I.; DURÁN, N.; PERALTA-ZAMORA, P. (2000). **Métodos e técnicas de tratamento de água.** Química Nova, 23, 504.
- GREGOR, J.E.; NOKES, C.J.; FENTON, E. (1997). **Optimizing natural organic matter removal from low turbidity waters by controlled pH adjustment of aluminium coagulation.** Water Research, 3, p. 2949-2958.
- GIORDANO, G. **Tratamento e Controle de Efluentes Industriais.** Apostila da ABES. Mato Grosso, 2004.
- GUTTERRES, M.; Aquim, P. M. **Wastewater Reuse Focused on Industrial Applications. Wastewater Reuse and Management.** 1 ed., 2013, v., p.127.
- IVES, K.J. (1984). Introduction. In : IVES, K.J. ed. **The scientific basis of flotation.** Proceedings of the NATO Advanced Science Institute on the Scientific Basis of Flotation, Cambridge, England, Jul, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, p.349-77.
- JENKINS, D. & HERMANOWICZ, S.W. (1991). **“Principles of chemical phosphate removal”, in Phosphorus and nitrogen removal from municipal wastewater,** 2nd ed., R.I. Seadlak, ed., Chelsea, MI, Lewis Publishers.
- JORDÃO E. P; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos.** 3. Ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995.
- KANAYAMA, Paulo Hélio. **Minimização de resíduos sólidos urbanos e conservação de energia.** 1999. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- KAWAMURA, S. **Optimisation of basis water-treatment process-design and operation: coagulation and flocculation.** Aqua. V. 45, n.1, p.35-47 (1997).
- LEME, F.P. (1990). **Teorias e técnicas de tratamento de águas.** ABES, Rio de Janeiro.
- LEME, E. J. A. **Manual Prático de tratamento de águas residuárias.** São Carlos: Edufscar, 2010. 595 p.
- LUNDGREN, H. (1970). **Recent advances in air flotation technology.** Tappi, v.53, n.2, p.287-89, Feb.
- MCCONHACHIE, G.L.; FOLKARD, G.K.; MTAWALI, M.A.; SUTHERLAND, J.D. (1999). **Field trials of appropriate hydraulic flocculation process.** Water Research v. 33, n.6, p.1425-1434.
- MENDES, G.G.N. (1989). **Estudo de coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- METCALF; EDDY (1991). **Wastewater Engineering: treatment disposal and reuse.** MCGRAW Hill, 3th edition, 1334p. New York.
- METCALF; EDDY (1995). **Wastewater Engineering: treatment disposal and reuse.** MCGRAW Hill, New York.

OLIVIA, L.C.H.V. (1997). **Tratamento de esgotos sanitários com reator anaeróbio de manta de lodo (UASB) protótipo: desempenho e respostas dinâmicas às sobrecargas hidráulicas**. São Carlos. 218 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

PACHECO, L. A. M. **Polieletrólitos como auxiliares de coagulação**. *Revista DAE, São Paulo*, v. 102, p. 46-60, 1970.

PENETRA, Rogério Gomes. **Pós-tratamento físico-químico por flotação de efluentes de reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB)**. 1998. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PHILLIPI, A.J. (2001). **Desenvolvimento de um equipamento para testes de floculação através de floculação em meio granular expandido**. Dissertação de Mestrado. Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.

REALI, M.A.P. (1991). **Concepção e Avaliação de um Sistema Compacto para Tratamento de Águas de Abastecimento Utilizando o Processo de Flotação por Ar Dissolvido e Filtração com Taxa Declinante**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo.

SANTOS FILHO, F. (1973). **Tecnologia de tratamento de água para a indústria**. Nobel. São Paulo.

SANTOS, C. **Prevenção à Poluição Industrial: Identificação de Oportunidades, Análise dos Benefícios e Barreiras**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SANT'ANNA JUNIOR, G. L. **Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro: Interciencia, 2010.

SCHOENHALS, Marlise et al. **Avaliação da eficiência do processo de flotação aplicado ao tratamento primário de efluentes de abatedouro avícola**. 2006.

SERENO FILHO, José Amaro et al. **Tratamento de efluentes da indústria de bebidas em reator anaeróbio de circulação interna (IC)**. *Revista Internacional de Ciências*, v. 3, n. 1, p. 21-42, 2013.

SIMIÃO, J. **Gerenciamento de resíduos sólidos industriais em uma empresa de usinagem sobre o enfoque da produção mais limpa**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

TCHOBANOGLIOUS G, BURTON FL, DAVID-STENSEL H. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. In: Metcalf & Eddy, Inc. 4th ed. New York McGraw-Hill Companies, 2003. p. 1819. (McGraw-Hill Series in Civil and Environmental Engineering).

VITERBO JR, Ênio. **Sistema integrado de gestão ambiental**. Editora Ground, 1998.

VON SPERLING, M. **Características das águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais, 1995.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – Universidade Federal de Minas Gerais, 2002. 428 p. (Princípio do tratamento biológico de águas residuárias; v.4).

WAKEMAN, R.J.; TARLETON, E.S. (1999). **Filtration: equipamento selection, modeling and process simulation**. Elsevier Science. New York. p. 446.

ZABEL, T. (1984). **Flotation in water treatment**. In : IVES, k.J. ed *The scientific basis of flotation*. Proceedings of the NATO Advanced Science Institute on the Scientific Basis of Flotation, Cambridge, England, Jul, Martinus Nijhoff Publishers, The Hagye, p.349-77.