



BRENO DE SOUZA ANDRADE

**AVALIAÇÃO E PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO DO TRATAMENTO DE
EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE PANIFICAÇÃO: ESTUDO DA
UTILIZAÇÃO DE COAGULANTES A BASE DE ALUMÍNIO E
POLÍMEROS**

**LAVRAS-MG
2023**

BRENO DE SOUZA ANDRADE

**AVALIAÇÃO E PROPOSTA DE ADEQUAÇÃO DO TRATAMENTO DE
EFLUENTES DE UMA INDÚSTRIA DE PANIFICAÇÃO: ESTUDO DA
UTILIZAÇÃO DE COAGULANTES A BASE DE ALUMÍNIO E
POLÍMEROS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Ronaldo Fia
Orientador

**LAVRAS-MG
2023**

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus pela sabedoria e por estar sempre ao meu lado neste importante ciclo da minha vida.

Agradeço aos meus pais Geraldo e Marlene pelo apoio e incentivo nos estudos, esta conquista não seria possível sem vocês.

Agradeço à toda minha família, especialmente aos meus irmãos Fabrício e Sabrina, pelo apoio e por sempre acreditarem no meu potencial. Ao meu sobrinho Davi Miguel e minha afilhada Maria Alice, agradeço por serem parte da minha motivação.

Agradeço aos meus amigos pela parceria e por ajudar a tornar a caminhada mais leve.

Agradeço a todos os meus professores pelos ensinamentos transmitidos nesse período, especialmente ao meu orientador Ronaldo Fia por todos os esclarecimentos e apoio durante o desenvolvimento do TCC.

RESUMO

Dispor de um sistema de tratamento de efluentes adequado e eficiente para tratar os efluentes e lançá-lo dentro dos padrões é uma obrigação ambiental de todos os geradores. Com o intuito de ajustar os parâmetros operacionais da estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma indústria de panificação congelada, foram realizadas a caracterização da estação, indicando os níveis de tratamento e tamanho das estruturas, além da realização de quatro ensaios de Jarrest com o coagulante policloreto de alumínio e um polímero aniônico sob condições de um pH mais ácido e de pH corrigido, visando determinar a dosagem mais eficaz para formação de flocos e clarificação do efluente. Além disso, foram analisados os dados já existentes do efluente bruto e tratado para realização de um diagnóstico do sistema em operação. Os resultados mostraram que para uma ação ótima do policloreto de alumínio, o pH do efluente deve estar em uma faixa de 6,5 a 7,0, além disso, a dosagem ideal a ser aplicada para as condições controladas de laboratório é de $0,25 \text{ mL L}^{-1}$, podendo variar dependendo das características do efluente, sendo encontrada, também a dosagem de $0,35 \text{ mL L}^{-1}$. Para o polímero, a quantidade aplicada é influenciada pelo modo de preparação da solução, sendo encontrada a dosagem de $1,0 \text{ mL L}^{-1}$ para uma solução mais concentrada e $4,0 \text{ mL L}^{-1}$ para mais diluída. Encontrou-se uma eficiência máxima de 99,7% para a remoção da turbidez do efluente combinando o PAC, polímero e pH corrigido. Compreender as variações das características do efluente industrial, as condições para um melhor desempenho na tratabilidade, e as atuais limitações mostrou-se fundamental na elaboração das propostas para adequação do sistema que não apresenta eficiência.

Palavras-chave: policloreto de alumínio, coagulação, floculação, efluente industrial

ABSTRACT

Having an adequate and efficient effluent treatment system to treat effluents and release them within standards is an environmental obligation for all generators. In order to adjust the operational parameters of the effluent treatment station (ETE) of a frozen bakery industry, the station was characterized, indicating the treatment levels and size of the structures, in addition to carrying out four Jarrest tests with the coagulant polyaluminum chloride and an anionic polymer under conditions of a more acidic pH and corrected pH, aiming to determine the most effective dosage for floc formation and effluent clarification. Furthermore, existing data on raw and treated effluent were analyzed to carry out a diagnosis of the system in operation. The results showed that for optimal action of aluminum polychloride, the pH of the effluent must be in a range of 6.5 to 7.0, in addition, the ideal dosage to be applied for controlled laboratory conditions is 0.25 mL L⁻¹, which may vary depending on the characteristics of the effluent, with a dosage of 0.35 mL L⁻¹ also being found. For the polymer, the amount applied is influenced by the way the solution is prepared, with a dosage of 1.0 mL L⁻¹ for a more concentrated solution and 4.0 mL L⁻¹ for a more diluted one. A maximum efficiency of 99.7% was found for removing effluent turbidity by combining PAC, polymer and corrected pH. Understanding the variations in the characteristics of industrial effluent, the conditions for better performance in treatability, and the current limitations proved to be fundamental in the preparation of proposals to adapt the system that is not efficient.

Keywords: aluminum polychloride, coagulation, flocculation, industrial effluent

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Fluxograma representando o percurso do efluente da indústria de panificação em estudo, desde geração até o lançamento na rede coletora da COPASA, após o tratamento. ... | 16 |
| Figura 2 – Diferentes unidades operacionais da ETE em estudo: (a) caixa de passagem com gradeamento, (b) caixa elevatória com menor capacidade localizada próximo a sala de higienização, e (c) caixa elevatória de maior volume localizada na ETE. | 17 |
| Figura 3 – (a) Caixa equalizadora de vazão com vertedouro triangular e (b) Calha Parshall da ETE em estudo. | 18 |
| Figura 4 – Decantador primário circular da ETE em estudo. | 19 |
| Figura 5 – Estruturas do reator UASB (em primeiro plano) e filtro biológico anaeróbico (ao fundo), que compõem o tratamento biológico da ETE em estudo. | 19 |
| Figura 6 – Aparato montado para a determinação do volume da solução de cal hidratada necessário para correção do pH do efluente industrial em estudo para valor de 6,5. | 22 |
| Figura 7 – Valores de demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e sólidos em suspensão observados no efluente bruto da indústria de panificação em estudo. | 24 |
| Figura 8 – Valores de demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e sólidos em suspensão observados no efluente tratado da indústria de panificação em estudo. | 25 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Padrões para lançamento estabelecidos pela COPASA de acordo com a norma técnica T. 187/6..... | 26 |
| Tabela 2 – Valores de pH medidos em pontos estratégicos durante os meses de monitoramento da ETE em estudo. | 27 |
| Tabela 3 – Resultado do primeiro ensaio de JarTest variando o volume de Policloreto de Alumínio (PAC) e sem ajuste de pH..... | 29 |
| Tabela 4 - Resultado do segundo teste do primeiro ensaio de JarTest com menores volumes pequenos de Policloreto de Alumínio (PAC) e sem ajuste de pH. | 30 |
| Tabela 5 - Resultado do segundo ensaio de JarTest variando o volume de Policloreto de Alumínio (PAC) com o pH corrigido com solução de cal hidratada e sem correção..... | 30 |
| Tabela 6 – Resultado do ensaio de JarTest para definição da quantidade de polímero com correção do pH do efluente e manutenção da quantidade de PAC. | 31 |
| Tabela 7 - Resultado do terceiro ensaio de JarTest variando o volume de Policloreto de alumínio (PAC) com o pH corrigido e aplicação de polímero. | 32 |
| Tabela 8 - Resultado do quarto ensaio de JarTest realizado com as condições mais bem ajustadas que apresentaram as melhores eficiências no terceiro ensaio para obtenção da DQO. | 33 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 9 |
| 2. OBJETIVO | 10 |
| 3. REFERENCIAL TEÓRICO..... | 11 |
| 3.1 Tratamento de Efluentes | 11 |
| 3.2 Tratamento Biológico | 11 |
| 3.3 Tratamento Físico-Químico | 13 |
| 3.4 Interferência do pH no processo de coagulação/floculação | 14 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS..... | 16 |
| 4.1 Caracterização do local de estudo..... | 16 |
| 4.2 Análises..... | 20 |
| 4.3 Procedimento experimental..... | 20 |
| 4.4 Proposta de melhorias no sistema de tratamento de efluentes | 23 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 23 |
| 5.1 Caracterização do efluente bruto e tratado realizado pela empresa | 23 |
| 5.2 Análise dos ensaios de JarTest com os produtos químicos de tratamento | 29 |
| 5.3 Proposta de adequação do tratamento do efluente industrial | 34 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 36 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 36 |

1. INTRODUÇÃO

O pão francês chegou ao Brasil com os portugueses e se consolidou como um dos principais produtos presentes na mesa do brasileiro. Um dos dados que atesta essa popularidade do pão no país é o consumo per capita do brasileiro, cerca de 22,61 kg de pães por ano. (SEBRAE-BA, 2017). O mercado de panificação está em alta no Brasil, atualmente, existem no país mais de 292,7 mil empresas no ramo, entre microempreendedores individuais (MEI) e micro e pequenas empresas. Desse universo, quase 9% (25,8 mil) foram abertas somente em 2023 (SEBRAE, 2023). Em 2021, o setor de panificação faturou no Brasil 105,85 bilhões de reais e foi responsável pela geração de 920 mil empregos diretos, 1,6 milhão de empregos indiretos e atende um público de 41 milhões de pessoas diariamente, comprovando assim a significativa relevância desse setor na economia brasileira (ABIP, 2021).

A indústria de panificação congelada, assim como outras atividades industriais, gera impactos negativos ao meio ambiente, que se não mitigados podem causar danos ao ecossistema e a saúde pública. Um dos impactos causados é a geração de efluentes durante suas atividades diárias, como na lavagem de equipamentos, utensílios e chão de fábrica. A composição desse tipo de efluente é predominantemente de matéria orgânica residual dos ingredientes utilizados nas receitas dos produtos, como farinha de trigo, fermentos, óleos e gorduras, e produtos químicos de limpeza.

O tratamento do efluente industrial é uma obrigação legal para os geradores e é fundamental para mitigar a poluição ambiental causada pelo seu lançamento sem tratamento adequado, que resulta em alteração da qualidade da água comprometendo a vida aquática e afetando diretamente a saúde da população. Por isso, as indústrias necessitam de um sistema de tratamento eficiente e capaz de promover alterações físicas, químicas e biológicas no efluente gerado para alcançar os padrões de lançamento conforme a legislação brasileira vigente.

A escolha de qual sistema de tratamento de efluentes a ser implantado em uma indústria, deve partir dos parâmetros de lançamento dispostos na legislação, da área disponível, do valor de investimento, dos custos operacionais, o impacto na vizinhança e principalmente pela característica do efluente que é gerado pelo empreendimento.

Em Minas Gerais, a Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG N° 8 de 2022 é a legislação mais recente que estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. A legislação permite o lançamento direto do efluente tratado em corpos de água, desde que sejam obedecidos os padrões, e o lançamento indireto no sistema de coleta e

tratamento da operadora responsável, podendo a operadora estabelecer diretrizes para o lançamento na sua rede e devendo atender aos parâmetros estabelecidos pela deliberação normativa (MINAS GERAIS, 2022).

Na cidade de Lavras/MG, onde está localizada a indústria de estudo, a coleta e tratamento do efluente doméstico é de responsabilidade da Companhia de Saneamento de Minas Gerais - COPASA. A COPASA possui um programa chamado PRECEND - Programa de Recebimento e Controle de Efluentes Não-Domésticos que é destinado aos empreendimentos que geram efluentes não domésticos e que necessitam utilizar a rede da companhia para lançar seus efluentes. Dessa forma o empreendimento assume a responsabilidade de cumprir os padrões de lançamento do programa e a concessionária assume a responsabilidade de receber, tratar o efluente e devolver ao meio de forma adequada.

O PRECEND é regulamentado pela Resolução ARSAE -MG 015/2012 e homologada pela Norma Técnica 187/6 onde estabelece os critérios para lançamento de efluentes na rede da operadora (MINAS GERAIS, 2012; ARSAE, 2018). A implementação do programa tem como vantagens assegurar a integridade das tubulações das redes coletoras, prevenir o lançamento de poluentes que não são removidos pela Estação de Tratamento de Efluentes e possam deteriorar o curso d'água e não permitir o lançamento de efluentes que possam desequilibrar o tratamento.

No caso de não atendimento aos padrões estabelecidos pelo PRECEND ou não envio do relatório monitoramento, o empreendimento está sujeito a multas que é calculada com base no princípio poluidor pagador, ou seja, é cobrado um percentual do valor da última fatura com base na quantidade que foi poluída. Fato que é recorrente para a indústria em estudo, que apresenta um histórico de pagamento de sobretaxas à COPASA devido a extrapolação dos limites de lançamento do efluente.

Desse modo, é importante e necessário que as indústrias possuam um sistema adequado para atender aos critérios de lançamento direto ou indireto, conforme suas necessidades. E quando o tratamento não estiver atendendo aos padrões, torna-se necessária a intervenção técnica para sua adequação, como ocorre na indústria de panificação objeto do presente estudo.

2. OBJETIVO

Assim, o trabalho teve como objetivo fazer a adequação do tratamento de efluentes de uma indústria de panificação localizada na cidade de Lavras-MG, e propor a solução para que

o sistema de tratamento de efluentes da indústria atenda aos parâmetros para lançamento na rede da COPASA pelo programa PRECEND.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Tratamento de Efluentes

Os efluentes de indústria de alimentos são caracterizados por altas concentrações de óleos e graxas, sulfatos, nitratos e fosfatos e conseqüentemente, apresentam elevada demanda química de oxigênio (DQO) e menor biodegradabilidade (NOUKEU et al., 2016).

As indústrias do setor alimentício geram efluentes com alto teor de gorduras e óleos, que possuem elevada DQO e demanda biológica de oxigênio (DBO). O tratamento destes efluentes se faz necessário, com o intuito de diminuir a matéria orgânica até atingir níveis aceitáveis, para que posteriormente a água utilizada nestes processos industriais seja devolvida ao meio ambiente sem prejudicá-lo ou reaproveitá-la no próprio processo (SANTANA et al., 2018).

O tratamento de resíduos poluidores das indústrias é, na maioria das vezes, uma prática relativamente complexa. Cada indústria tem suas particularidades. Existem muitas variáveis envolvidas que dificultam a padronização de processos de tratamento. Entre essas variáveis, podemos citar: as diferentes matérias-primas, os diversos processos de produção, as condições climáticas, a disponibilidade de água, entre outras. Sendo assim, raramente, as soluções para tratamento de efluentes podem ser transplantadas diretamente de uma unidade industrial para outra (QASIM; MANE, 2013; SABA et al., 2023), demandando por ajustes específicos para cada realidade.

Os tratamentos dos efluentes industriais devem seguir à legislação ambiental em vigor para a localidade do empreendimento. O tratamento consiste na transformação dos poluentes dissolvidos e em suspensão em gases inertes e ou sólidos sedimentáveis para, nas próximas etapas, ocorrer a separação das fases sólida e líquida (BRANCO; ZORZIN, 2016).

3.2 Tratamento Biológico

Dentre as maneiras de tratamento de um efluente líquido como carga orgânica, está o tratamento biológico (aeróbio e anaeróbio). Os processos anaeróbios de tratamento de efluentes industriais e domésticos, no Brasil, são tecnologias de baixo custo econômico e energético, e

de resposta satisfatória, tanto do ponto de vista empresarial, como dos órgãos de fiscalização e de pesquisa (CHERNICCHARO et al., 2015).

Assim, devido à baixa produção de sólidos, baixo consumo de energia, baixos custos de implantação e operação, tolerância a elevadas cargas orgânicas e possibilidade de operação com elevados tempos de retenção de sólidos, os reatores anaeróbios possuem grande aplicabilidade no tratamento de águas residuárias, concentradas e diluídas (KONG et al., 2019).

Nesses processos, o tratamento é realizado por meio de atividades de bactérias, leveduras, fungos filamentosos e protozoários para remoção de contaminantes. Nesses tratamentos, as substâncias orgânicas biodegradáveis (coloidais ou dissolvidas) são metabolizadas por microrganismos que utilizam os compostos orgânicos como fonte de carbono e de energia. Inicialmente, os organismos produzem os sistemas enzimáticos específicos requeridos em função dos substratos presentes. Quando a biodegradação é completa, as substâncias são convertidas em gás carbônico, metano e água. Após esse tratamento, a biomassa é removida por sedimentação (HARIRCHI et al., 2022).

O tratamento biológico fundamenta-se na utilização de compostos poluentes como substrato para o crescimento e manutenção de microrganismos. Dependendo da natureza do aceptor de elétrons, os processos biológicos podem ser divididos em aeróbios, anóxicos ou anaeróbios. Nos aeróbios, que levam à formação de CO_2 e H_2O , o aceptor de elétrons é o oxigênio molecular. Nos anaeróbios, que degradam a matéria orgânica a CO_2 e CH_4 , o oxigênio molecular está ausente. Os processos anóxicos ocorrem na ausência de oxigênio livre, mas participam como aceptores de elétrons algumas formas de enxofre e nitrogênio oxidadas, como sulfato, nitrito e nitrato (VON SPERLING, 2014).

A biodegradação depende da presença de uma população microbiana, diversificada e estável e da interação entre os diversos microrganismos presentes no meio. Entre outros fatores que nem sempre são controlados com facilidade, ressalta-se o pH e a temperatura. Além disso, o longo tempo de degradação e a maior necessidade de área para a implantação das estações desse tratamento podem dificultar a aplicação dos processos biológicos (ALI SHAH et al., 2014).

No caso do tratamento biológico/secundário na indústria de panificação, os nutrientes presentes no efluente que alimenta o reator biológico muitas vezes não são suficientes para atingir a relação DBO:N:P necessária para degradar completamente a matéria orgânica (MOHAN; VIVEKANANDHAN; PRIYADHARSHINI, 2017). Ainda, a remoção incompleta de óleos e graxas no tratamento preliminar/primário também tem uma influência prejudicial no tratamento biológico (EL-GAWAD, 2014).

Devido à constante necessidade de tratamentos de menor custo, acessível e que não demandam por grandes áreas, e otimização dos processos biológicos, o tratamento físico-químico em efluentes agroindustriais pode ser utilizado como pré-tratamento de efluentes em reatores biológicos, utilizando coagulantes alternativos, sendo tratamento viável de redução da matéria orgânica para posteriormente passar pelo tratamento biológico, ou em alguns casos substituir o processo biológico (ALVES et al., 2022).

3.3 Tratamento Físico-Químico

O tratamento físico-químico consiste na coagulação seguida da floculação e sedimentação. Na coagulação ocorre a desestabilização dos coloides, decorrente da adição de agentes coagulantes, diminuindo a repulsão elétrica entre as partículas que passam a formar aglomerados. Na fase de floculação esses aglomerados se unem, formando então os flocos, que sedimentam, devido à força da gravidade (ORSSATTO et al., 2018).

Desta forma, a coagulação é um processo combinado de mecanismos que favorecem a atração entre as partículas coloidais e a desestabilização das cargas negativas por meio de agitação rápida e da adição de produto químico apropriado, normalmente sais de ferro ou alumínio ou de floculantes sintéticos (JIANG, 2015).

Com a adição dos coagulantes químicos, estes reagem com a alcalinidade presente ou adicionada nas águas residuárias, formando hidróxidos que desestabilizam coloides, partículas em suspensão, pela redução do seu potencial zeta a valores próximos de zero, denominado ponto isoelétrico (DI- BERNARDO, DANTAS, 2005), tal fato auxilia na aglutinação das partículas na etapa seguinte, a floculação, que com o menor gradiente hidráulico favorece a formação de sólidos maiores, passíveis de decantação.

Na decantação ocorre a sedimentação, sob ação da gravidade, da matéria floculada. Essa etapa é viabilizada pela floculação quando coágulos se tornam mais densos e estáveis, formando os flocos. Os flocos sedimentam, arrastando além dos compostos poluentes, muitos microrganismos. O período da permanência da água em um decantador deve ser superior ao tempo necessário para que a partícula se desloque desde a superfície até o fundo do tanque (DI- BERNARDO, DANTAS, 2005).

Os processos físicos e químicos por coagulação-floculação de águas residuárias, decorrentes dos processos industriais são largamente utilizados para reduzir a carga orgânica, considerando a elevada eficiência na remoção, a praticidade operacional e os custos envolvidos. Na maioria das vezes, esse tratamento precede o tratamento biológico auxiliando na remoção de fósforo e de sólidos suspensos (SANTANA et al., 2018).

Polímeros orgânicos naturais e sintéticos têm sido utilizados como coadjuvantes da coagulação no tratamento da água; atuam como uma ponte para o coagulante ajudar na remoção das partículas formadas quando sais de alumínio ou de ferro são utilizados como coagulante. Logo, na etapa de floculação, os grandes agregados de flocos que arrastam os poluentes, precipitam mais rapidamente e conseqüentemente, a eficiência do processo é maior (JIANG, 2015).

Os coagulantes podem ser de origem orgânica ou inorgânica, dentre os inorgânicos, os mais utilizados são: sulfato de alumínio, policloreto de alumínio (PAC) e cloreto férrico. Entre os orgânicos estão os a base de taninos e poliamidas. Sob o ponto de vista econômico, geralmente, são mais utilizados os inorgânicos, por apresentarem alta eficiência e baixo custo. Já sob a ótica ambiental, os mais adequados são os orgânicos, já que em seu lodo gerado não carregam resquícios de sais de ferro e alumínio (ISHAK et al., 2020).

Dentre os diferentes compostos químicos à base de ferro e alumínio, destacam-se aqueles que apresentam melhor desempenho atrelado ao menor consumo de produto, e conseqüentemente o mesmo custo. Entre eles, destaca-se o policloreto de alumínio (PAC) (DING et al., 2017).

O PAC é um coagulante inorgânico de baixo peso molecular e pré-polimerizado, apresentando-se na forma líquida com aparência viscosa. Ele possui cadeias de polímeros pré-formadas, contendo uma alta concentração de carga catiônica na unidade polimérica. Apresenta capacidade de formar flocos com uma velocidade superior aos coagulantes tradicionais, não pré-polimerizados, o que garante que os flocos possuam maior densidade, e assim, a precipitação ocorre mais rapidamente (ANÍCIO, LOPES, OLIVEIRA, 2021).

Poucos são os dados de literatura com a utilização do PAC no processo de coagulação de águas residuárias. Martín et al. (2011) verificaram que mesmo que a remoção de matéria orgânica tenha sido elevada com a aplicação do PAC em efluente da indústria de alimentos (maionese, ketchup e outros molhos), a sua concentração ainda não era adequada para a disposição no ambiente, tornando obrigatório um tratamento biológico posterior. Com a aplicação de carvão ativado junto com o PAC, Othman et al. (2014) verificaram boas remoções de matéria orgânica do efluente da produção de óleo de palma, verificando valores de DQO e Sólidos Suspensos inferiores ao do curso d'água.

3.4 Interferência no processo de coagulação/floculação

Muitos fatores influenciam a coagulação, entre os quais se destacam a espécie e a quantidade de coagulante, o tempo de mistura e floculação e o pH do efluente.

O processo de coagulação-floculação apresenta dois tipos de mistura, rápida e lenta. O objetivo principal da mistura rápida é garantir a homogeneização da água após a adição do coagulante, enquanto a etapa lenta tem como finalidade promover um maior choque entre as partículas desestabilizadas, favorecendo assim a formação dos flocos. Baixas velocidades de mistura lenta podem levar a formação de flocos pequenos e difícil sedimentação. Velocidades muito altas aumentam as taxas de colisão, mas, em sua maioria, fazem com que os flocos se quebrem (TEH et al., 2016).

Os polímeros usados como floculantes são geralmente sintéticos, solúveis em água e usualmente apresentam cargas em sua superfície, sendo muitas vezes chamados de polieletrólitos. Podem ser caracterizados quanto a sua natureza iônica como aniônicos, catiônicos ou não-iônicos (BOLTO et al., 2007). Esses polímeros são responsáveis pelo aumento no tamanho dos flocos e de densidade (MATILAINEN et al., 2010).

A dosagem ótima de coagulante é um fator crítico para a eficiência do processo de coagulação-floculação. Quando operado em condições ótimas são reduzidos os custos de operação (TEH et al., 2016). Baixas dosagem de coagulante podem levar a uma baixa performance do processo, pois não serão capazes de desestabilizar os coloides. Entretanto, sobredosagens podem levar a re-estabilização dos coloides e redução de eficiência do processo (NAIR et al., 2014).

Nesse processo, há pelo menos uma zona de pH em qualquer efluente considerado, no qual a boa floculação ocorre no tempo mais curto com uma determinada dose de coagulante, ou então em um determinado tempo com a mínima dose de coagulante. A coagulação, sempre que possível, deve ser realizada dentro dessa zona ótima. Em consequência disto, alguns efluentes necessitam de ajustes de pH, de maneira a tornar a coagulação econômica e eficiente. Porém, o fator que mais influencia o tempo requerido para a boa formação de floco é a quantidade de coagulante (DI- BERNARDO, DANTAS, 2005).

O mecanismo de coagulação-floculação ocorre quando coagulante suficiente foi disperso para desestabilizar suficientemente as partículas coloidais e o floculante permite que as partículas se aglomerem em flocos maiores. Para que ocorra a desestabilização, o PAC requer alcalinidade suficiente para uma hidrólise adequada. Isto leva à formação de hidróxido insolúvel cuja precipitação reduz DQO e sólidos em suspensão (AHMAD; ISMAIL; BHATIA, 2005). Consequentemente, um pH alcalino inicial é adequado para favorecer a formação de $Al(OH)_3$, e melhora o processo de coagulação. Bhatia, Othman e Ahmad (2007) verificaram valores adequados de pH entre 5 e 6 no tratamento de efluentes da indústria de produção de óleo de palma com PAC. Enquanto Martín et al. (2011) obtiveram os melhores resultados com

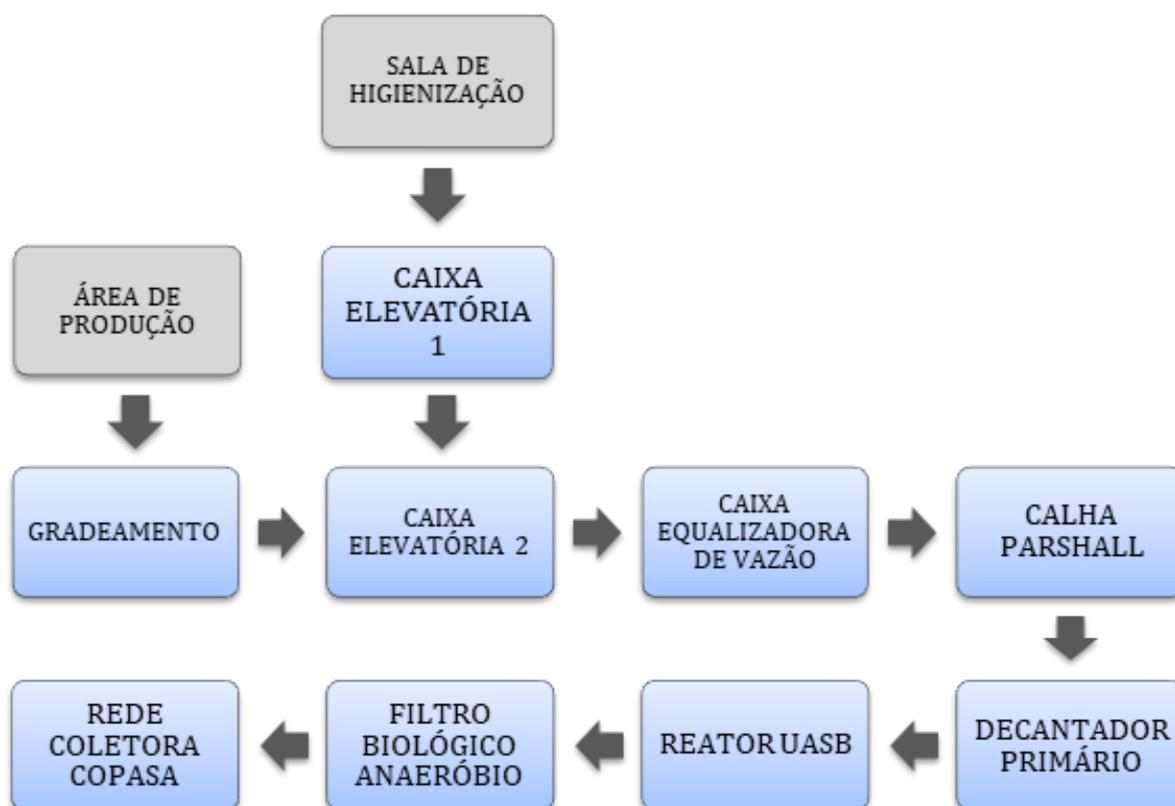
pH igual a 7,9 ao aplicarem o PAC em efluente agroindustrial.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização do local de estudo

O presente estudo foi realizado em uma estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma indústria de panificação situada em Lavras-MG. A ETE em questão ocupa uma área de 42,6 m², possui um sistema de tratamento compacto composto por tratamento preliminar, primário e secundário. Na Figura 1 está representado o fluxograma com as etapas do tratamento de efluentes da indústria.

Figura 1 – Fluxograma representando o percurso do efluente da indústria de panificação em estudo, desde geração até o lançamento na rede coletora da COPASA, após o tratamento.



Fonte: Do Autor (2023)

A ETE recebe o efluente industrial proveniente de três turnos de trabalho, totalizando 24 horas de operação e um volume médio de efluente tratado de aproximadamente 20 m³ dia⁻¹.

¹. O efluente gerado, proveniente da limpeza de caixas, equipamentos, utensílios e da fábrica, é conduzido até a estação por meio de gravidade e bombeamento. O efluente gerado dentro da área de produção é conduzido por quatro tubos de PVC, com diâmetros de 200 mm, 150 mm, 100 mm e 50 mm, até uma caixa de passagem com gradeamento na ETE, com dimensões de 1,90 m de comprimento, 0,90 m de largura e 1,50 m de profundidade. O efluente gerado na sala de higienização dos equipamentos e utensílios é conduzido até uma caixa de passagem, localizada no fundo externo da sala, com as dimensões de 2,0 m de comprimento, 0,85 m de largura e 0,60 m de profundidade, acumulado em uma caixa elevatória de 1.800 litros e posteriormente bombeado para outra caixa elevatória de 2.500 litros localizada na estação de tratamento de efluentes. A caixa elevatória contém um agitador que funciona 24 horas a fim de evitar a sedimentação de farinha e formação de massa que possa vir a prejudicar o funcionamento da bomba. A Figura 2 apresenta a caixa de passagem com gradeamento e as caixas elevatórias.

Figura 2 – Diferentes unidades operacionais da ETE em estudo: (a) caixa de passagem com gradeamento, (b) caixa elevatória com menor capacidade localizada próximo a sala de higienização, e (c) caixa elevatória de maior volume localizada na ETE.



Fonte: Do Autor (2023).

Após o efluente ser armazenado na caixa elevatória de maior volume localizada na ETE e atingir um nível específico, a bomba é acionada e esse é bombeado para uma caixa equalizadora de vazão de 200 litros, fabricada em poliéster reforçado em fibra de vidro (PRFV), que contém um vertedouro do tipo triangular para auxiliar na equalização do efluente. Depois, o efluente passa por uma calha Parshall, de PRFV e largura da seção estrangulada (garganta)

de 1 polegada e, onde é adicionada a solução de cal hidratada para corrigir o pH e o coagulante policloreto de alumínio (PAC). A dosagem dos produtos químicos é feita por meio de duas bombas dosadoras do tipo diafragma, com vazões de 5 L h^{-1} e 1 L h^{-1} , localizadas dentro do laboratório da ETE. Na Figura 3 são mostradas as estruturas da caixa equalizadora de vazão e calha Parshall da ETE em estudo.

Figura 3 – (a) Caixa equalizadora de vazão com vertedouro triangular e (b) Calha Parshall da ETE em estudo.



Fonte: Do Autor (2023).

Depois de receber os produtos químicos, o efluente é conduzido por uma tubulação de PVC com diâmetro de 100 mm para o tratamento primário em um decantador circular com fundo inclinado, onde ocorre a sedimentação dos flocos formados pela coagulação/floculação dos sólidos suspensos e dissolvidos. O decantador primário é construído em PRFV (Figura 4), possui volume de 5 m^3 e tempo de detenção hidráulica (TDH) de 6 horas.

Figura 4 – Decantador primário circular da ETE em estudo.



Fonte: Do Autor (2023).

Depois do tratamento físico-químico o efluente passa pela última etapa de tratamento, o tratamento secundário que é composto por um reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (Reator UASB) e um filtro biológico anaeróbio (Figura 5).

Figura 5 – Estruturas do reator UASB (em primeiro plano) e filtro biológico anaeróbio (ao fundo), que compõem o tratamento biológico da ETE em estudo.



Fonte: Do Autor (2023)

O UASB e o filtro biológico anaeróbio são construídos em PRFV. O primeiro possui volume de 15 m³, altura de 2,55 metros, área de 5,94 m² e TDH de 18 h. O segundo recebe o efluente do UASB por uma tubulação de PVC com diâmetro de 100 mm, possui escoamento ascendente em meio filtrante composto por brita número 4, volume de 10 m³, área superficial de 5,94 m² e TDH de 12 h. Após o tratamento o efluente é lançado na rede coletora da COPASA.

Os lodos gerados nas caixas de passagem, no decantador primário e pelo tratamento biológico, são coletados quinzenalmente por uma empresa que presta serviços de coleta, transporte e destinação final de resíduos.

4.2 Análises

A ETE possui um laboratório para a realização de algumas análises diárias com o intuito de monitorar a eficiência de tratamento e a qualidade do efluente lançado na rede coletora. As variáveis controladas diariamente são o pH e a DQO do efluente tratado. A amostra de efluente é coletada em um béquer de vidro com capacidade de 50 mL e o pH medido por um medidor de pH digital portátil. A DQO da amostra é obtida por colorimetria após a digestão em refluxo fechado (APHA, AWWA, WEF, 2005).

Esporadicamente, também é analisado o pH horário do efluente bruto com o intuito de observar a variabilidade, bem como o pH do reator UASB para avaliar o enquadramento dentro da faixa ideal para o tratamento biológico.

4.3 Procedimento experimental

Foram realizados ensaios em JarTest no efluente bruto da indústria de panificação para obter as melhores dosagens dos produtos químicos utilizados para o tratamento do efluente industrial, visando a melhor eficiência de clarificação e remoção da DQO do efluente. Foram realizados quatro ensaios em que foram testados (1) a dosagem do coagulante sem correção de pH e (2) com o valor de pH fixado, (3) a dosagem do polímero e, a partir dos melhores resultados anteriores, foi realizado novo ensaio (4) para obtenção da DQO. Para os ensaios de JarTest foram levados em consideração algumas condições que acontecem na prática da ETE, como a velocidade de mistura, o tempo de agitação e o tempo de repouso para a sedimentação, visando uma melhor reprodução do ambiente real.

No primeiro ensaio com o JarTest foram testadas doze diferentes dosagens do coagulante Policloreto de Alumínio (Aln (OH)_m Cl_{3n-m}) que variaram de 0,015 mL a 0,65 mL por litro de efluente. Na primeira repetição foram testadas dosagens no intervalo de 0,15 –

0,65 mL com variação de 0,10 mL, já na segunda foram testadas outras seis dosagens mais baixas, que variaram de 0,015 a 0,10 mL por litro de efluente. Como o coagulante possui um aspecto viscoso, foi realizada uma diluição de 1% (v/v) para que não houvesse perda do produto nas vidrarias. O produto foi adicionado em todos os jarros e depois a agitação foi realizada em uma rotação de 100 rpm por 30 segundos. Após esse processo, as amostras ficaram em repouso por 10 minutos e mediu-se a turbidez, em turbidímetro de bancada e pH do sobrenadante por potenciometria (APHA, AWWA, WEF, 2005). A eficiência quanto a remoção de turbidez foi obtida por meio da Equação 1.

$$E = \left(\frac{TEB - TET}{TET} \right) \times 100 \quad (1)$$

em que:

E = eficiência de remoção da turbidez (%);

TEB = turbidez do efluente bruto (uT);

TET = turbidez da amostra após o ensaio em JarTest (uT).

No segundo ensaio foram testadas cinco dosagens diferentes do PAC com o pH da amostra corrigido em 6,5 com a solução de cal hidratada (hidróxido de cálcio) à 100 g L⁻¹. A faixa de fixação do pH foi escolhida com base no resultado do primeiro ensaio, onde obteve-se a melhor eficiência na amostra sob as condições do pH de 6,5. Para determinar o volume de cal hidratada necessário para a correção do pH, foi montado um sistema com agitador magnético, bureta graduada e medidor de pH. Na amostra de efluente adicionou-se o volume de PAC e com o auxílio do agitador efetuou-se a adição da solução de cal hidratada pouco a pouco até o valor de pH alcançar 6,5, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Aparato montado para a determinação do volume da solução de cal hidratada necessário para correção do pH do efluente industrial em estudo para valor de 6,5.



Fonte: Do Autor (2023).

Com a obtenção do volume de solução de cal hidratada ideal para correção do pH, o ensaio de JarTest foi realizado com dosagens de PAC que variaram de 0,18 mL a 0,35 mL, por litro de efluente, em uma agitação com rotação de 100 rpm por 30 segundos e 10 minutos de repouso. Após o fim do tempo de sedimentação, foi determinada a turbidez e o pH do sobrenadante.

No terceiro ensaio de JarTest realizado foi introduzido um novo composto químico, o polímero aniônico, que passará a ser utilizado na ETE industrial, composto de poliácridamida aniônica, para auxiliar na formação dos flocos e na clarificação do efluente tratado. Realizou-se em uma primeira etapa um ensaio no JarTest para determinar qual a melhor dosagem do polímero a ser utilizado. Nesta etapa foi fixada uma dosagem de 0,25 mL de PAC e 1,0 mL de solução de cal hidratada para correção do pH e a dosagem do polímero aniônico foi variada de 0,5 mL a 1,25 mL com variação de 0,25 mL, sendo agitado por 45 segundos em uma rotação de 250 rpm, e repouso por 10 minutos, após este tempo foi realizada a análise de turbidez e de pH do sobrenadante.

A segunda etapa com o JarTest no terceiro ensaio foi realizada variando seis dosagens do PAC em um intervalo de 0,10 mL a 0,35 mL com variação de 0,05 mL. O pH foi novamente corrigido para 6,5 com a solução de cal hidratada, onde seguiu-se os mesmos procedimentos já descritos anteriormente para determinar o volume necessário da solução para fixação do pH.

Posteriormente, o ensaio no JarTest foi realizado com uma agitação de 250 rpm com as soluções de PAC e cal hidratada já pré-adicionadas durante 02 minutos e 30 segundos, sendo o polímero adicionado no período de agitação. Depois, a amostra ficou em repouso durante 10 minutos e foi feita a leitura da turbidez e do pH do sobrenadante.

No quarto ensaio o objetivo principal era a avaliação da eficiência do tratamento físico-químico na remoção da DQO, que é o principal parâmetro de lançamento do Programa de Recebimento e Controle de Efluentes Não Domésticos (PRECEND) da COPASA e que tem passado por oscilações. Sendo assim, foi repetida a segunda etapa do terceiro ensaio com as dosagens de PAC que obtiveram as três maiores eficiências de remoção da turbidez, ou seja, as dosagens de 0,25, 0,30 e 0,35 mL. Após o ensaio, foram realizadas as análises de pH, turbidez e DQO do sobrenadante. A DQO foi determinada pelo método colorimétrico em duplicata, sendo calculada a DQO média para cada amostra. Além disso, foi preparado uma amostra com 1 litro de água e o mesmo volume de polímero utilizado no ensaio para avaliar a contribuição do polímero na DQO.

4.4 Proposta de melhorias no sistema de tratamento de efluentes

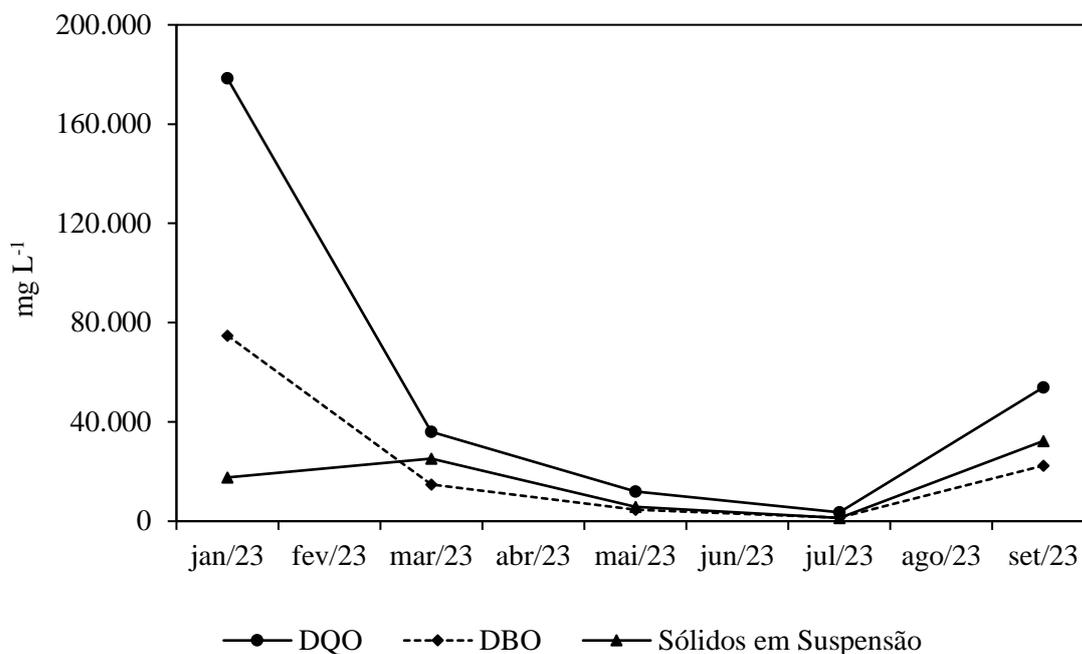
A partir dos ensaios de JarTest realizados em laboratório com os produtos químicos que já são utilizados na estação de tratamento de efluentes (cal e PAC) e que será incluído (polímero), e dos dados de controle e análises já realizadas, serão propostas adequações de ajuste de dosagens, de operação e alterações estruturais para melhoria da eficiência de tratamento da ETE.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do efluente bruto e tratado realizado pela empresa

As análises físico-químicas do efluente são realizadas mensalmente para o efluente tratado e bimestralmente para o efluente bruto, conforme estabelecido por contrato com a companhia de saneamento. Nas Figuras 7 e 8 estão apresentados os resultados de algumas variáveis que foram analisados no ano de 2022 e 2023 para o efluente bruto e tratado.

Figura 7 – Valores de demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e sólidos em suspensão observados no efluente bruto da indústria de panificação em estudo.



Fonte: Compilado pelo Autor (2023).

Analisando o Figura 7 nota-se uma grande variabilidade da concentração de matéria orgânica no efluente bruto ao longo do ano, com elevados valores de DQO e DBO no mês de janeiro, 178.422 e 74.806 mg L⁻¹, respectivamente, apresentando uma queda no segundo, terceiro e início do quarto bimestre, quando se atingiu os menores patamares no ano para DQO e DBO, 3.577 e 1.426 mg L⁻¹, respectivamente. No quinto bimestre os valores voltaram a apresentar elevação, atingindo valores de 53.935 mg L⁻¹ para DQO e 22.336 mg L⁻¹ para DBO. Nota-se ainda a tendência de similaridade na variação da concentração de DBO, DQO e SS.

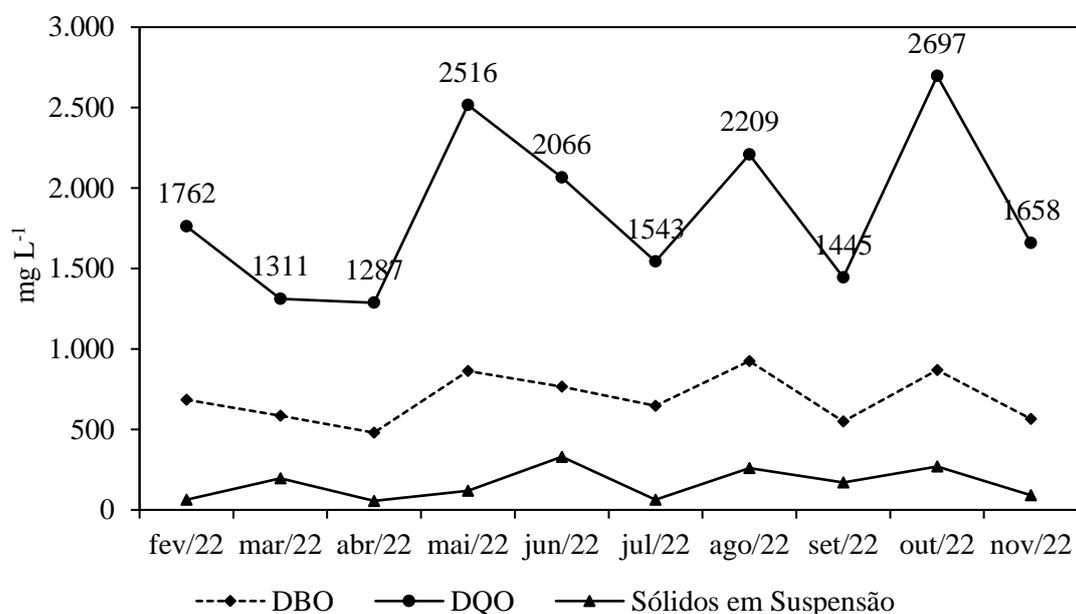
O aumento dos valores da concentração orgânica que foram apresentados no mês de setembro de 2023 podem ser justificados pelos meses em que acontecem alta produção na indústria, devido às festividades de fim de ano. Outro fator que possa ter superestimado os resultados da carga orgânica foi a coleta da amostra, realizada por um laboratório terceiro, em que pode ser sido amostrada uma grande proporção da gordura sobrenadante da caixa elevatória, que é o ponto amostral do efluente bruto.

Os valores elevados também para os sólidos em suspensão, com pico de 32.312 mg L⁻¹ no mês de setembro, geralmente são proporcionais com a elevação da matéria orgânica

indicando uma significativa presença de uma carga orgânica particulada no efluente e que pode ser removida por processos físico-químicos, desde que empregados adequadamente.

Os valores observados entre maio e julho de 2023 para DQO foram próximos aos valores médios verificados por Santana et al. (2018) de 6.400 mg L⁻¹ ao analisarem efluentes de panificação, que apresentam elevados valores de matéria orgânica que podem variar de 1.000 a 10.000 mg L⁻¹ (QASIM; MANE, 2013; NOUKEU et al., 2016). Como observado no presente trabalho, Singharat et al. (2017) citam maiores variações de valores de DBO (906 a 24.000 mg L⁻¹) e DQO (2.910 a 50.400 mg L⁻¹) para os efluentes de panificação.

Figura 8 – Valores de demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e sólidos em suspensão observados no efluente tratado da indústria de panificação em estudo.



Fonte: Compilado pelo Autor (2023).

A Norma Técnica T. 187/6 de 2018 da COPASA estabelece quais são as condições e critérios para o lançamento de efluentes líquidos não domésticos no sistema de esgotamento sanitário da companhia. A Tabela 1 apresenta os limites estabelecidos pela norma técnica para cada um dos parâmetros que são obrigatórios serem analisados pelo empreendimento.

Tabela 1 – Padrões para lançamento estabelecidos pela COPASA de acordo com a norma técnica T. 187/6.

| Variáveis | Unidade de Medida | Limite Permitido |
|---------------------------------|--------------------|------------------|
| pH | - | 6,0 – 10,0 |
| Temperatura | °C | ≤ 40 |
| Sólidos Sedimentáveis | mL L ⁻¹ | 20 |
| Sólidos em Suspensão Totais | mg L ⁻¹ | 300 |
| Gorduras, óleos e graxas totais | mg L ⁻¹ | 150 |
| DQO | mg L ⁻¹ | 450 |
| Substâncias Tensoativas | mg L ⁻¹ | 5,0 |

Fonte: ARSAE-MG (2018).

O ponto de amostra para a análise do efluente tratado é após a saída do filtro biológico anaeróbio (FBA), ou seja, após o tratamento biológico e na última etapa do tratamento. Os resultados de DQO, principal parâmetro de lançamento do PRECEND, apresentados na Figura 8, estão fora do padrão de lançamento na rede coletora da COPASA, que é de até 450 mg L⁻¹ e indicam que o atual sistema de tratamento não está adequado para ser recebido pela companhia de saneamento. Os valores de sólidos em suspensão apresentados estão, na maioria dos meses, dentro do padrão de lançamento, de até 300 mg L⁻¹, exceto para o mês de junho onde o valor foi de 330 mg L⁻¹.

A partir das Figuras 7 e 8 nota-se que independente dos valores afluentes, o sistema é capaz de amortizar as concentrações efluentes de DBO e SS. Entretanto, o mesmo fato não é observado para a DQO, que pode estar relacionada à matéria orgânica de menor biodegradabilidade e dissolvida. Corroborando com os resultados observados por Noukeu et al. (2016) ao analisarem diferentes efluentes da indústria de alimentos.

A Tabela 2 apresenta os dados de monitoramento de pH realizados na ETE em estudo durante os meses de abril a julho de 2023. Os pontos amostrais foram escolhidos visando compreender as variações de pH e o grau de comprometimento do tratamento biológico.

Tabela 2 – Valores de pH medidos em pontos estratégicos durante os meses de monitoramento da ETE em estudo.

| Data | Efluente | Saída | UASB | UASB | UASB | FBA |
|------------|----------|------------|---------|-------|---------|-------|
| | Bruto | Decantador | Entrada | Saída | Interno | Saída |
| 24/04/2023 | 9,0 | 5,2 | 5,0 | 4,4 | 4,8 | 5,1 |
| 23/05/2023 | 11,2 | 7,1 | 6,3 | 5,6 | 4,8 | 5,2 |
| 26/06/2023 | 5,7 | 5,9 | 6,1 | 5,3 | 4,4 | 5,2 |
| 30/06/2023 | 6,2 | 6,8 | 6,7 | 5,2 | 11,4 | 5,1 |
| 18/07/2023 | 7,2 | 6,4 | 6,3 | 4,2 | 4,4 | 5,5 |

Fonte: Do Autor (2023).

Nota-se primeiramente uma grande variação do pH do efluente bruto, evento característico de efluentes industriais, e que se deve ao fato da utilização de produtos químicos alcalinos para a limpeza da fábrica, de utensílios e equipamentos, como detergente e desincrustante. A alteração do pH do efluente bruto para uma faixa mais alcalina ocorre principalmente nos horários próximos das mudanças de turno de produção, onde a limpeza ocorre de maneira mais intensa. Singharat et al. (2017) verificaram que, em média, os efluentes de panificação apresentaram pH em torno de 6,0.

Um fator importante de se mencionar é que a aplicação da solução de cal no tratamento, com o objetivo de aumentar o pH e alcalinidade, iniciou-se no mês de junho de 2023 e observa-se na Tabela 2 que não houve efeito de mudanças de pH do efluente após o início da medida. Com exceção do pH medido no dia 30/06/2023 do conteúdo interno do UASB, onde obteve-se um valor de 11,4, devido a um erro operacional de dosagem de cal diretamente no UASB com o objetivo de corrigir a acidez interna do reator.

Observando os valores de pH das estruturas do tratamento biológico (UASB e FBA) percebe-se que há uma condição ácida dentro do UASB, independente da variação e aumento do pH afluente ao tratamento.

Visualmente, nota-se que o decantador tem operado com sobrecarga, devido ao amplo intervalo de tempo entre as limpezas realizadas por caminhões do tipo limpa-fossa. Ao abrir os amostradores de lodo do reator UASB, nota-se que ele está com excesso de sólidos, com coloração acinzentada devido ao grande volume de sólidos compostos por farinha de trigo, proveniente do decantador. E não apresenta lodo com a coloração característica do lodo anaeróbio, que é preto.

Nos reatores biológicos é onde ocorre as principais reação biológicas de degradação da matéria orgânica. Sob condições normais, sem intervenção para correção do pH, o valor encontrado para a variável foi menor que 5,0, o que compromete a ação de microrganismos importantes para a remoção da matéria orgânica, principalmente as arqueias metanogênicas, que são um grupo mais sensíveis às condições do meio (ALI SHAH et al., 2014). Os microrganismos produtores de metano têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 6,6 e 7,4, embora se possa conseguir estabilidade, na formação de metano, numa faixa mais ampla de pH, entre 6,0 e 8,0. Valores de pH abaixo de 6,0 e acima de 8,3 devem ser evitados, uma vez que estes podem inibir por completo os microrganismos formadores de metano (HARIRCHI et al., 2022).

O fato de haver a inibição das atividades dos microrganismos metanogênicos, devido aos baixos valores de pH do meio, promove o azedamento do reator, uma vez que as bactérias acidogênicas ainda continuam ativas produzindo ácidos voláteis. Com relação a estabilidade do processo, o fato das bactérias produtoras de ácidos serem muito menos sensitivas ao pH que as arqueias metanogênicas é particularmente importante, uma vez que as bactérias acidogênicas podem ainda se mostrar bastante ativa mesmo para valores de pH tão baixos quanto 4,5 (CHERNICHARO, 2007).

O controle da alcalinidade e acidez no processo de degradação aeróbica é fundamental. Singharat et al. (2017) avaliaram um reator UASB em dois estágios no tratamento e efluentes de panificação e verificaram eficiência de remoção de SS e DQO de 86 e 88%, com a manutenção de pH em torno de 7,2. Verificaram ainda que a manutenção do pH acima da neutralidade reduziu a concentração de ácidos voláteis no reator e manteve a estabilidade do sistema. Corroborando com o que foi observado no presente trabalho, os autores verificaram que a remoção de DQO solúvel foi menor (75%), ou seja, o UASB não se mostrou tão eficiente na remoção de DQO solúvel. No presente trabalho este fato pode ter resultado em maior variação dos valores efluentes de DQO (Figura 8).

Além disso, os valores de pH na saída do sistema (FBA) não estão dentro do limite de lançamento permitido pela norma técnica T. 187/6, que estabelece os valores entre 6,0 e 10,0, demandando pelo aumento de alcalinidade no sistema com a adição de cal, por exemplo.

5.2 Análise dos ensaios de JarTest com os produtos químicos de tratamento

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados determinados no primeiro ensaio de JarTest realizado para encontrar a melhor dosagem do coagulante PAC por litro de efluente para a redução da turbidez, que inicialmente foi de 365 uT. O pH inicial medido foi de 8,68.

Tabela 3 – Resultado do primeiro ensaio de JarTest variando o volume de Policloreto de Alumínio (PAC) e sem ajuste de pH.

| Amostra (1 L) | PAC (mL) | pH | Turbidez (uT) | Eficiência (%) |
|---------------|----------|------|---------------|----------------|
| Jarro 1 | 0,15 | 6,96 | 130 | 64,38 |
| Jarro 2 | 0,25 | 6,43 | 75,1 | 79,42 |
| Jarro 3 | 0,35 | 5,80 | 339 | 7,12 |
| Jarro 4 | 0,45 | 5,21 | 450 | 0 |
| Jarro 5 | 0,55 | 4,82 | 416 | 0 |
| Jarro 6 | 0,65 | 4,54 | 402 | 0 |

Fonte: Do Autor (2023).

Diante dos resultados apresentados, nota-se que o PAC tem uma melhor atuação em um pH próximo a 6,5, como é observado na amostra do jarro 2. No jarro 1 obteve-se também uma eficiência considerável com um pH próximo do neutro, porém, menor que a do jarro 2, que pode ser justificada pela menor quantidade de PAC utilizada. No jarro 3 a baixa eficiência de remoção de turbidez para a dosagem de 0,35 mL de PAC pode ser explicada pelo fato do pH da amostra se encontrar abaixo de 6,0 e a condição de acidez interferir na formação de flocos, conforme verificado por Ahmad; Ismail e Bhatia (2005). Nos jarros 4, 5 e 6 nota-se uma condição de acidez maior, interferindo de forma significativa na formação de flocos. Sendo assim, como não houve flocos formados e sedimentação, a quantidade de PAC em solução, que possui uma coloração de aspecto amarelado, contribuiu para um aumento da turbidez resultando em eficiência igual a zero.

Os valores determinados na segunda repetição do primeiro ensaio, onde foram testadas menores quantidades de PAC e com turbidez inicial de 365 uT, estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultado do segundo teste do primeiro ensaio de JarTest com menores volumes pequenos de Policloreto de Alumínio (PAC) e sem ajuste de pH.

| Amostra (1 L) | PAC (mL) | pH | Turbidez (uT) | Eficiência (%) |
|---------------|----------|------|---------------|----------------|
| Jarro 1 | 0,100 | 6,91 | 402 | 0 |
| Jarro 2 | 0,075 | 7,00 | 433 | 0 |
| Jarro 3 | 0,050 | 7,21 | 435 | 0 |
| Jarro 4 | 0,025 | 7,30 | 440 | 0 |
| Jarro 5 | 0,020 | 7,52 | 438 | 0 |
| Jarro 6 | 0,015 | 7,58 | 418 | 0 |

Fonte: Do Autor (2023).

Analisando os resultados do segundo teste, pôde-se perceber que apesar do pH das amostras permanecerem dentro de uma faixa próxima a neutralidade, sem apresentar condições ácidas, as dosagens do coagulante testadas foram pequenas e não foram suficientes para flocular os sólidos suspensos das amostras de efluente e formar flocos, resultando no aumento da turbidez devido ao acréscimo da coloração do PAC na solução. Assim, não só o controle do pH, mas também a dosagem do PAC e é fator essencial no processo de tratamento físico-químico do efluente da indústria de panificação.

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados encontrados no segundo ensaio com JarTest, onde foram testadas o comportamento das amostras sem a correção de pH e amostras com o pH corrigido. A turbidez inicial do efluente foi de 495 uT e pH de 6,92.

Tabela 5 - Resultado do segundo ensaio de JarTest variando o volume de Policloreto de Alumínio (PAC) com o pH corrigido com solução de cal hidratada e sem correção.

| Amostra (1 L) | PAC (mL) | pH inicial | Cal (mL) | pH corrigido | Turbidez (uT) | Eficiência (%) |
|---------------|----------|------------|----------|--------------|---------------|----------------|
| Jarro 1 | 0,18 | 6,14 | - | - | 387 | 20,21 |
| Jarro 2 | 0,20 | 5,84 | - | - | 393 | 18,97 |
| Jarro 3 | 0,25 | 5,24 | 0,8 | 6,23 | 87,2 | 82,02 |
| Jarro 4 | 0,30 | 5,12 | 0,8 | 6,20 | 261 | 46,19 |
| Jarro 5 | 0,35 | 5,05 | 1,1 | 6,10 | 313 | 35,46 |

Fonte: Do Autor (2023).

Analisando os valores encontrados no segundo ensaio, verifica-se que a dosagem de 0,25 mL continuou apresentando a melhor eficiência de remoção de turbidez, mesmo com o pH das amostras com maiores dosagens de PAC sendo corrigido para uma faixa maior que 6,0. Outro fator observado é que no jarro 2, onde foi utilizado um volume de 0,20 mL de PAC e não houve correção do pH, o valor do pH determinado foi de 5,84 e a eficiência de remoção de turbidez foi muito baixa comparada com a eficiência do jarro 3, tendo em vista que os volumes de PAC utilizados nos dois jarros são próximos. Além disso, nota-se que o pH que deveria ser corrigido para 6,5 nos jarros 3, 4 e 5, variaram entre 6,10 e 6,23. Tal fato pode ser justificado pela ocorrência de sedimentação dos sólidos presente na solução de cal hidratada na bureta (utilizada para a dosagem) enquanto se realizava a determinação do volume necessário da solução de cal para corrigir o pH, deixando a solução mais concentrada e subestimando o volume realmente necessário.

No terceiro ensaio foi incorporado um polímero para auxiliar na floculação e clarificação do efluente. Na Tabela 6 estão apresentados os resultados do ensaio de JarTest com o objetivo de encontrar a melhor dosagem desse composto. A turbidez inicial do efluente foi de 445 uT.

Tabela 6 – Resultado do ensaio de JarTest para definição da quantidade de polímero com correção do pH do efluente e manutenção da quantidade de PAC.

| Amostra (1 L) | PAC (mL) | Polímero (mL) | Cal (mL) | Turbidez (uT) | Eficiência (%) |
|---------------|----------|---------------|----------|---------------|----------------|
| Jarro 1 | 0,25 | 0,50 | 1,0 | 28,3 | 93,6 |
| Jarro 2 | 0,25 | 0,75 | 1,0 | 40,0 | 91,0 |
| Jarro 3 | 0,25 | 1,00 | 1,0 | 20,4 | 95,4 |
| Jarro 6 | 0,25 | 1,25 | 1,0 | 96,0 | 78,4 |

Fonte: Do Autor (2023).

Nota-se que a manutenção das concentrações de PAC e o ajuste do pH do efluente para valores próximos a 6,5, proporcionou boas eficiências de remoção de turbidez. Apesar da variação entre as dosagens de 0,5 e 1,0 mL do polímero, nota-se que para a dosagem maior (1,25 mL) houve tendência de redução da eficiência. Na Tabela 7 estão apresentados os valores determinados no terceiro ensaio com Jarrest variando dosagens de PAC com pH corrigido e realizando a aplicação de polímero, de forma a compilar os melhores resultados observados

nos ensaios anteriores. Neste ensaio, o efluente apresentou turbidez de 445 uT e pH igual a 6,77.

Tabela 7 - Resultado do terceiro ensaio de JarTest variando o volume de Policloreto de alumínio (PAC) com o pH corrigido e aplicação de polímero.

| Amostra (1 L) | PAC (mL) | Polímero (mL) | pH inicial | Cal (mL) | pH corrigido | Turbidez (uT) | Eficiência (%) |
|---------------|----------|---------------|------------|----------|--------------|---------------|----------------|
| Jarro 1 | 0,10 | 1,0 | 6,11 | 0,3 | 7,07 | 98,8 | 77,8 |
| Jarro 2 | 0,15 | 1,0 | 5,89 | 0,6 | 6,87 | 60,0 | 86,5 |
| Jarro 3 | 0,20 | 1,0 | 5,58 | 1,1 | 6,84 | 39,7 | 91,1 |
| Jarro 4 | 0,25 | 1,0 | 5,39 | 1,3 | 6,83 | 22,4 | 94,9 |
| Jarro 5 | 0,30 | 1,0 | 5,35 | 1,6 | 6,86 | 10,7 | 97,6 |
| Jarro 6 | 0,35 | 1,0 | 5,23 | 1,9 | 6,85 | 2,83 | 99,4 |

Fonte: Do Autor (2023).

Observando os resultados na Tabela 7, nota-se que os valores do pH corrigido estão mais próximos e em uma faixa maior que 6,5, isso se deve ao fato de que a solução de cal, utilizada para corrigir o pH da amostra, foi homogeneizada na bureta e evitou-se a precipitação dos sólidos dentro dela.

Além disso, a integração do polímero no ensaio com o objetivo de promover uma maior aglutinação e adensamento dos flocos formados pela ação do coagulante, mostrou um resultado muito satisfatório na clarificação do efluente. Fato que pode ser comprovado pelas eficiências de remoção de turbidez alcançadas, acima de 90% para os jarros 3, 4, 5 e 6, e mesmo nos jarros em que se utilizou menores quantidades de PAC, 0,10 mL e 0,15 mL - jarros 1 e 2, foram obtidas eficiências de remoção maiores que nos outros ensaios.

Ahmad; Ismail e Bhatia (2005) comprovaram que a adição de polímero facilita o processo de coagulação e melhora a remoção dos poluentes em saios de coagulação-floculação de efluente da indústria de produção de óleo de palma. Verificaram que 15.000 mg L⁻¹ de coagulante a base de alumínio e 300 mg L⁻¹ de floculante/polímero em pH 6,0 foi suficiente para produzir efluente com turbidez de 20 uT, para valores iniciais de até 1409 uT.

Outro fator importante ocorrido no ensaio para se destacar, é que quando se deu início aos 10 minutos de repouso das amostras notou-se uma rápida sedimentação dos flocos formados e consequentemente clarificação das amostras dos jarros 5 e 6. Sendo assim, o

polímero auxiliou na obtenção de uma rápida velocidade de sedimentação e clarificação do efluente.

Os resultados do quarto ensaio, realizado com as condições mais bem ajustadas que apresentaram as melhores eficiências no terceiro ensaio, para a determinação da DQO estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultado do quarto ensaio de JarTest realizado com as condições mais bem ajustadas que apresentaram as melhores eficiências no terceiro ensaio para obtenção da DQO.

| Amostra (1 L) | PAC (mL) | Polímero (mL) | pH inicial | Cal (mL) | pH corrigido | Turbidez (uT) | Eficiência (%) | DQO média (mgL ⁻¹) |
|------------------|-------------|------------------|---------------|-------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------------------------|
| Jarro 1 | 0,25 | 4,0 | 5,82 | 0,6 | 7,02 | 13,1 | 98,8 | 918 |
| Jarro 2 | 0,30 | 4,0 | 5,63 | 0,7 | 7,24 | 5,86 | 99,5 | 886 |
| Jarro 3 | 0,35 | 4,0 | 5,33 | 1,1 | 7,05 | 3,42 | 99,7 | 914 |

Fonte: Do Autor (2023).

É importante destacar que para a realização do quarto ensaio, a amostra do efluente bruto apresentava visualmente menos gordura sobrenadante que as amostras dos ensaios anteriores. A turbidez no efluente foi de 1.100 uT e pH de 6,70.

Além disso, o polímero utilizado neste ensaio possuía um aspecto menos viscoso que o utilizado no terceiro ensaio. Sendo assim, por estar menos concentrado, foi necessário utilizar uma maior dosagem do polímero para obter a clarificação alcançada no terceiro ensaio. Outro fator que diferenciou o quarto com o terceiro ensaio, foi o fato da solução de cal hidrata estar mais concentrada, necessitando de uma menor quantidade da solução para a correção do pH.

Observando os dados de remoção da turbidez, foi alcançada uma eficiência satisfatória e próxima do que foi alcançado no teste anterior. Para a concentração de 0,35 mL L⁻¹ obteve-se a melhor eficiência, 99,7%, valor próximo dos 99,4% encontrada encontrado no terceiro ensaio. Os jarros 1 e 2 com as quantidades de 0,25 e 0,30 mL, respectivamente, obtiveram eficiências de 98,8% e 99,5%, valores superiores aos do terceiro ensaio. O aumento da eficiência pode ser justificado pelo maior tempo de mistura ocorrido no quarto ensaio, tendo em vista que foi adicionado primeiramente 2 mL de polímero com 2 minutos e 30 segundos de agitação e depois as 2 mL restantes com o mesmo tempo de agitação.

Com base nos valores de DQO média obtidos (Tabela 8) constata-se que apenas o tratamento físico-químico do efluente não é suficiente para deixá-lo dentro do limite permitido,

de até 450 mg L⁻¹ para disposição na rede da concessionária. Sendo assim, há a necessidade de complementar o tratamento com a etapa biológica (UASB + FBA). De acordo com Von Sperling (2014) a eficiência típica de remoção de DQO para o sistema UASB + filtro biológico é entre 70 e 80%, podendo ser maior (88%) conforme as pesquisas de Singharat et al. (2017) ao tratarem efluentes de panificação em reator UASB. Portanto, se é considerada uma eficiência de remoção de 70% para o maior valor de DQO encontrado, jarro 2 (Tabela 8), haverá uma DQO efluente inferior a 300 mg L⁻¹, valor dentro do padrão de lançamento para a COPASA.

A contribuição do polímero na DQO efluente pode ser desprezada, uma vez que os resultados para DQO com a amostra composta de água e polímero não foram obtidos pelo espectrofotômetro, sendo igual a zero.

5.3 Proposta de adequação do tratamento do efluente industrial

Visando o atendimento aos limites de lançamento estabelecidos pela norma T 187/6, se faz necessária a adequação do atual sistema de tratamento de efluentes adotado pela indústria. Para a elaboração das propostas de melhorias foram buscadas as melhores alternativas que solucionem as problemáticas já levantadas nesse estudo, visando aproveitar a estrutura já existente no local.

Nesse estudo, encontrou-se que a faixa ótima do pH para que ocorra a melhor ação do PAC é entre 6,5 e 7,2. Porém, de acordo com a Tabela 2, o efluente sofre grandes variações ao longo do dia, principalmente quando há limpeza e uso de produtos alcalinos dentro de fábrica. Sendo assim, faz-se necessário a implantação de um sistema de monitoramento contínuo do pH, permitindo a supervisão em tempo real e possibilitando que seja realizado ajustes quando necessário. O sensor de pH deve ser instalado no ponto onde ocorre a mistura dos produtos químicos (PAC, cal e polímero), ou seja, na caixa equalizadora de vazão (200 litros) para que seja avaliado se o pH está na faixa ideal para a floculação. Alinhado ao monitoramento do pH, que é o ponto essencial do tratamento, é importante a adoção de mecanismos automatizados para a adição de soluções ácidas ou básicas, por meio de bomba dosadora, a fim de minimizar as flutuações de pH e mantê-lo sempre dentro da faixa ideal para o tratamento físico-químico.

Outro mecanismo que pode ser adotado com o intuito de segurar as variações diárias do pH do efluente bruto, é a instalação de uma caixa elevatória com uma maior capacidade de armazenamento, cerca de 60% do volume diário gerado, já que as grandes variações são observadas próxima as mudanças de turno. Acompanhada de um misturador, a nova elevatória funcionaria como um equalizador e o efluente gerado em diferentes horários do dia seria homogeneizado, minimizando as variações do pH e conseqüentemente tendo uma menor

necessidade de ajuste do pH. Logo, seria evitado uma superdosagem de PAC com o objetivo de reduzir o pH, tendo em vista que atualmente não é adotado o uso de ácido na ETE em estudo para o tratamento do efluente. O PAC é geralmente formulado como $Al_n(OH)_mCl_{3n-m}$, combinado com pequenas quantidades de outros compostos. A relação $m/3n$ representa a basicidade deste produto, e devido à esta característica o PAC libera durante a hidrólise, em igualdade de dosagem em íons metálicos, uma quantidade de ácido consideravelmente menor do que a liberada pelo cloreto de alumínio e pelos coagulantes tradicionais como o sulfato de alumínio, cloreto férrico e sulfato ferroso (CONSTANTINO; YAMAMURA, 2009).

Ademais, é necessário a aquisição de novas bombas dosadoras para a aplicação do polímero e da solução de cal, tendo em vista que as bombas utilizadas atualmente possuem a vazão de 1 L h^{-1} e de acordo com os ensaios realizados neste estudo, será necessário dosar, por litro de efluente, no mínimo 1,0 mL de polímero (no caso de estar mais concentrado) e em média 1,5 mL de cal. Sendo necessário bombas com vazões de 15 L h^{-1} e 20 L h^{-1} para dosagem de polímero e cal, respectivamente, se levar em consideração a atual vazão da bomba situada na caixa elevatória, de aproximadamente $3,12\text{ L s}^{-1}$ (11.232 L h^{-1}). Outra alternativa seria a redução da vazão afluente do tratamento químico para $1,8\text{ L s}^{-1}$ (6.480 L h^{-1}) para que seja necessário bombas dosadoras de menores capacidades, de 10 L h^{-1} para dosagem do polímero e cal.

Outro ponto que necessita de adequação, é o aumento da frequência da limpeza do lodo de fundo do decantador para uma limpeza semanal, tendo em vista que as duas retiradas mensais já realizadas não são suficientes devido ao arraste de sólidos observado. Além disso, com o ajuste de pH na etapa de floculação e dosagem correta dos produtos químicos, a sedimentação ocorrerá de forma mais eficiente e haverá mais formação de lodo.

Devido ao comprometimento da etapa biológica da ETE em estudo, e a percepção da presença de sólidos de colocação clara, semelhante a farinha de trigo, quando se abre os amostradores do UASB, consequência do arraste de sólidos e da má eficiência na etapa de sedimentação, propõe-se uma limpeza do UASB e do FBA para a retirada total do material orgânico, que não se apresenta no momento com características de um lodo biológico anaeróbio. Alinhando-se a essa ação, é necessária uma nova partida do UASB para a formação de uma nova microbiologia sob as condições necessárias. De acordo com Chernicharo (2007) a partida dos reatores anaeróbios pode ser conseguida de três formas: utilizando-se lodo de inóculo adaptado ao esgoto tratado, lodo não adaptado ao esgoto a ser tratado e sem a utilização de lodo de inóculo. Considerando a dificuldade em encontrar um lodo adaptado as mesmas características do efluente da ETE em estudo, e a demora de uma resposta do sistema no

desenvolvimento da massa microbiana, no caso de haver partida sem inóculo, recomenda-se, para a partida do sistema, que seja realizada a inoculação com lodo anaeróbio não adaptado ao efluente em estudo.

Além disso, é importante possuir um monitoramento constante de alguns parâmetros fundamentais para verificar a estabilidade do UASB como: pH, alcalinidade e ácidos orgânicos voláteis. A medição do pH e temperatura afluente e nos amostradores deve ser diária. A análise de alcalinidade e ácidos deverá ser no mínimo semanal para avaliar se há sinais de que a fermentação ácida está prevalecendo no reator, podendo levá-lo ao azedamento.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados das análises da DQO do efluente tratado e dos dados de monitoramento das condições de operação da ETE em estudo, indicam que a mesma não está adequada para lançamento na rede coletora da COPASA. Sendo assim, se faz necessário a implementação de medidas de adequação para atendimento à legislação.

O acréscimo do polímero no tratamento químico, como um agente auxiliar no adensamento dos flocos, apresentou um melhor resultado para a clarificação do efluente quanto apenas ao uso do PAC em meio a pH corrigido, sendo indispensável o seu uso.

Os ensaios para as dosagens ótimas de coagulante e polímero e da DQO efluente do processo de clarificação, constatou que apenas a adequação da etapa físico-química do tratamento é insuficiente para o ajustar a ETE para o lançamento na rede coletora conforme os padrões de lançamento.

O êxito no tratamento de qualquer sistema está estritamente relacionado a sua operação. Por isso, é importante que se crie uma rotina de controle operacional e padronize os processos de tratamento na ETE para garantir o funcionamento adequado de cada unidade. A avaliação da estabilidade do UASB é um ponto crucial para evitar novamente o azedamento do reator e comprometer todos os esforços tomados para retomar a estabilidade do mesmo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIP - Associação Brasileira da Indústria de Panificação e Confeitaria. **O mercado da panificação e a pandemia**. Disponível em: <<https://www.abip.org.br/site/o-mercado-da-panificacao-e-a-pandemia/>>. Acesso em: 13 nov de 2023.

AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS DE ÁGUA E ESGOTO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (ARSAE-MG). **Norma Técnica T 187-6**. Belo Horizonte: ARSAE-MG, 2018. Disponível em: <<https://arsae.mg.gov.br/images/documentos/legislacao/2019/PRECEND%20NORMA%20CNICA%20T%20187-6.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2023.

AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS DE ÁGUA E ESGOTO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (ARSAE-MG). **Resolução ARSAE-MG nº 015**, de 2012. Belo Horizonte: ARSAE-MG, 2012.

AHMAD, A. L.; ISMAIL, S.; BHATIA, S. Optimization of coagulation– flocculation process for palm oil mill effluent using response surface methodology. **Environmental science & technology**, v. 39, n. 8, p. 2828-2834, 2005.

ALI SHAH, Fayyaz et al. Microbial ecology of anaerobic digesters: the key players of anaerobiosis. **The Scientific World Journal**, v. 2014, 2014.

ALVES, Ana Gabriela Tomé et al. Investigation of new natural coagulant-cationic hemicellulose associated with cationic tannin-for coagulation/dissolved air flotation (C/DAF) in the treatment of industrial effluent. **Revista Ambiente & Água**, v. 17, 2022.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard methods for the examination of water and wastewater. **American Public Health Association**. 21° ed. Washington DC: 2005.

AQUINO, S. F.; CHERNICHARO, C. A. L. Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGVs) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle. **Engenharia Sanitária Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 2, p. 152-161, 2005.

BHATIA, Subhash; OTHMAN, Zalina; AHMAD, Abdul Latif. Coagulation–flocculation process for POME treatment using Moringa oleifera seeds extract: optimization studies. **Chemical Engineering Journal**, v. 133, n. 1-3, p. 205-212, 2007.

BRANCO, G. K.;ZORZIN, L. **Tratamento de Efluente de Matadouro e Frigorífico de Suínos por meio de Coagulante Orgânico**.2016.TCC (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental)-Universidade Tecnológica Federal do Paraná –UTFPR, Departamento Acadêmico de Ciências Biológicas e Ambiental. Medianeira, 2016.

BOLTO, Brian; GREGORY, John. Organic polyelectrolytes in water treatment. **Water research**, v. 41, n. 11, p. 2301-2324, 2007.

CHERNICHARO, C. A. L. et al. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 14, p. 649-679, 2015.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Reatores Anaeróbios: Fundamentos, Modelagem e Aspectos Operacionais**. Volume 5. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007.

DE OLIVEIRA A., Sabrina; DOS SANTOS L., Verônica; DE OLIVEIRA, André Luiz. PSD and Fractal Dimension for flocculation with different parameters and ferric chloride, aluminium polychloride and aluminium sulfate as coagulants. **Journal of Water Process Engineering**, v. 43, p. 102180, 2021.

DE SANTANA, Marcela Marcondes et al. Electrochemical treatment of wastewater from a bakery industry: Experimental and modeling study. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 116, p. 685-692, 2018.

DI-BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**, 2.ed., São Paulo: Rima, 2005, v. 1.

DING, Weijun et al. Effective swine wastewater treatment by combining microbial fuel cells with flocculation. **Chemosphere**, v. 182, p. 567-573, 2017.

EL-GAWAD, Abd et al. Oil and grease removal from industrial wastewater using new utility approach. **Advances in Environmental Chemistry**, v. 2014, 2014.

HARIRCHI, Sharareh et al. Microbiological insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review. **Bioengineered**, v. 13, n. 3, p. 6521-6557, 2022.

ISHAK, Siti Aisyah et al. The application of modified natural polymers in toxicant dye compounds wastewater: A review. **Water**, v. 12, n. 7, p. 2032, 2020.

JIANG, Jia-Qian. The role of coagulation in water treatment. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 8, p. 36-44, 2015.

KONG, Zhe et al. Challenges and prospects for the anaerobic treatment of chemical-industrial organic wastewater: a review. **Journal of cleaner production**, v. 231, p. 913-927, 2019.

MARTÍN, M. A. et al. Optimization of coagulation–flocculation process for wastewater derived from sauce manufacturing using factorial design of experiments. **Chemical Engineering Journal**, v. 172, n. 2-3, p. 771-782, 2011.

MATILAINEN, Anu; VEPSÄLÄINEN, Mikko; SILLANPÄÄ, Mika. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. **Advances in colloid and interface science**, v. 159, n. 2, p. 189-197, 2010.

MINAS GERAIS. Comitê Estadual de Recursos Hídricos (CERH). Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM). Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG N° 8, de 2022. **Diário do Executivo**: Belo Horizonte, 2022.

MOHAN, S. et al. Performance evaluation of modified UASB Reactor for treating bakery effluent. **International Journal of Applied Environmental Sciences**, v. 12, n. 11, p. 1883-1894, 2017.

NAIR, Abhilash T.; MAKWANA, Abhipsa R.; AHAMMED, M. Mansoor. The use of response surface methodology for modelling and analysis of water and wastewater treatment processes: a review. **Water science and technology**, v. 69, n. 3, p. 464-478, 2014.

NOUKEU, N. A. et al. Characterization of effluent from food processing industries and stillage treatment trial with *Eichhornia crassipes* (Mart.) and *Panicum maximum* (Jacq.). **Water resources and industry**, v. 16, p. 1-18, 2016.

OTHMAN, Mohd Ridzuan et al. Treatment of effluents from palm oil mill process to achieve river water quality for reuse as recycled water in a zero emission system. **Journal of Cleaner Production**, v. 67, p. 58-61, 2014.

QASIM, Wael; MANE, A. V. Characterization and treatment of selected food industrial effluents by coagulation and adsorption techniques. **Water Resources and Industry**, v. 4, p. 1-12, 2013.

SABA, Beenish et al. Characterization and potential valorization of industrial food processing wastes. **Science of The Total Environment**, v. 868, p. 161550, 2023.

SEBRAE. **Indústria da Panificação**. Salvador: Sebrae, 2007. 45 p. Disponível em: <<https://sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/BA/Anexos/Ind%C3%BAstria%20da%20panifica%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2023.

SEBRAE. **Uma em cada dez empresas de panificação no Brasil foi aberta em 2023**. Disponível em: <https://agenciasebrae.com.br/cultura-emprededora/uma-em-cada-dez-empresas-de-panificacao-no-brasil-foi-aberta-em-2023/>. Acesso em: 19 nov. 2023.

TEH, Chee Yang et al. Recent advancement of coagulation–flocculation and its application in wastewater treatment. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 55, n. 16, p. 4363-4389, 2016.

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos: princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.