



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# Avaliação e Proposta de Melhoria para Estação de Tratamento de Esgoto de Porto Alegre

*Autor: Murilo Paim Ramos*

*Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Liliana Amaral Féris*

*Coorientador: Dr<sup>a</sup> Keila Guerra Pacheco Nunes*

Porto Alegre, novembro de 2021

Autor: Murilo Paim Ramos

## Avaliação e Proposta de Melhoria para Estação de Tratamento de Esgoto de Porto Alegre

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à COMGRAD/ENQ da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química*

Orientador: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Liliana Amaral Féris  
Coorientador: Dr<sup>a</sup> Keila Guerra Pacheco Nunes

Banca Examinadora:

Prof<sup>o</sup> Dr<sup>o</sup>, Pedro Rafael Bolognese Fernandes, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Msc, Letícia Reggiane de Carvalho Costa, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre

2021

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus. Sem fé não seria possível chegar ao fim deste curso nem atingir os objetivos que tanto almejei.

Aos meus pais, Gilnei e Carla, ao meu irmão Victor e à Daniela e Salomé, pelo apoio, suporte, confiança e por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos, fossem eles bons ou ruins. Sem vocês nada disso seria possível e essa conquista dedico a vocês!

À minha namorada, Júlia, e à sua família, que me acolheram e me deram suporte durante boa parte da graduação, tornando-se como uma segunda família para mim.

Aos grandes amigos que fiz durante o andamento da faculdade, por todos os bons momentos vividos e dificuldades superadas em conjunto. Unidos, fomos mais fortes e chegamos mais longe do que chegaríamos sozinhos.

À minha orientadora Liliana e coorientadora Keila, por aceitarem me auxiliar na elaboração deste trabalho. Sua ajuda foi fundamental e suas sugestões foram sempre muito pertinentes, tornando o trabalho melhor e mais exequível.

À minha orientadora de estágio, Michely Zat, e à toda a equipe da Inova Consultoria Ambiental. Com vocês pude aprender engenharia química na prática e me apaixonar pela profissão. Também agradeço à Franciele Mazzocco e à equipe da Focus Franquias, por todo o aprendizado no mundo dos negócios e bons momentos vividos.

Ademais, gostaria de agradecer a todos aqueles que de alguma forma fizeram parte da minha graduação, mas não foram citados aqui. Vivi os melhores anos da minha vida até agora neste período que está chegando ao fim e se você participou dele de alguma maneira, saiba que me sinto grato.

## RESUMO

O descarte de esgotos domésticos sem tratamento é um dos principais causadores de contaminação de recursos hídricos, causando impactos significativos nos ecossistemas aquáticos. Um dos principais problemas relacionados ao fato é a eutrofização, causada pelos nutrientes presentes em alta concentração nos esgotos. Diante disso, destaca-se a importância da eficiência das estações de tratamento de esgotos, responsáveis por tornar o esgoto apto a ser disposto nos corpos d'água. Neste contexto, o presente trabalho realizou um estudo de caso sobre uma estação de tratamento de esgotos de Porto Alegre/RS, onde buscou-se avaliar a eficiência do sistema de tratamento quanto aos parâmetros de qualidade e propor melhorias. Foram avaliados os parâmetros DQO, DBO, nitrogênio, fósforo, SST, óleos e graxas, pH, sólidos sedimentáveis, surfactantes e coliformes termotolerantes, no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020, comparando com a legislação vigente para o estado do Rio Grande do Sul (CONSEMA 355/2017). Também foi realizada uma análise da estrutura física da estação de tratamento, considerando as operações unitárias presentes no processo de tratamento e a microfauna biológica presente nos flocos do tratamento de lodos ativados. Com base nesta avaliação, observou-se que a ETE é ineficiente no tratamento dos parâmetros Fósforo e Sólidos Sedimentáveis, fato que resulta da ausência de um tratamento físico-químico na estação e do excesso de bactérias filamentosas na estrutura do flocos biológico, resultando em uma possível flotação dos flocos biológicos. Foi realizado um teste de alguns coagulantes químicos disponíveis no mercado e, com base nos resultados obtidos e no diagnóstico da estação, foi proposto como melhoria a implementação do tratamento de coagulação por cloreto férrico 38%, realizado no decantador secundário da estação. Esta ação de melhoria sanaria conjuntamente os problemas relacionados ao fósforo e à sedimentação do lodo, possibilitando o atingimento dos valores exigidos pela legislação para os dois parâmetros.

**Palavras-chave:** Estação de tratamento de esgotos, fósforo, coagulação, cloreto férrico.

## ABSTRACT

Discharge of sewage without any treatment is one of the main causes of contamination of water resources, causing significant impacts on aquatic ecosystems. One of the main problems related to that fact is eutrophication, caused by nutrients present in high concentration on sewage. Therefore, the importance of efficiency on sewage treatment systems, responsible for making it suitable for disposal, is highlighted. In this context, the present work performed a case study about a sewage treatment station in Porto Alegre/RS, looking to assess the sewage treatment station's efficiency about the evaluated quality parameters and propose improvements. The parameters COD, BOD, nitrogen, phosphorus, TSS, Oils and greases, pH, sedimentable solids, surfactants and thermotolerant coliforms, analysing the historic data in period between 2016 february and 2020 february, and comparing the results with current legislation (CONSEMA 355/2017). An analysis of the physical structure of the treatment plant was also carried out, evaluating the unit operations present in the treatment process and the biological microfauna present in the activated sludge treatment flakes. Based on this evaluation, it was observed that the sewage treatment system is inefficient in treatment of phosphorus and sedimentable solids, a fact that results from the absence of physical chemical treatment and the excess of filamentous bacteria on the structure of biological flakes, resulting in a possible flotation. An analysis of some chemical coagulants available on the market was carried out and, based on the results obtained and the diagnosis of the station, the implementation of the coagulation treatment with 38% ferric chloride, carried out in the secondary decanter of the station, was proposed as an improvement. This improvement action would jointly remedy the problems related to phosphorus and sludge sedimentation, enabling the achievement of the values required by legislation for both parameters.

**Keywords:** *sewage treatment station, phosphorus, coagulation, ferric chloride.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Macro etapas do tratamento de esgotos e seus respectivos objetivos. ....	2
Figura 2: Mapa de distribuição das estações de tratamento de efluentes no Brasil em 2017 separadas por conjunto de tipologias.....	7
Figura 3: Fluxograma qualitativo dos principais sistemas de lagoas de estabilização. ....	8
Figura 4: Fluxograma qualitativo de um sistema de tratamento contendo um reator anaeróbico UASB para uma ETE genérica.....	9
Figura 5: Distribuição percentual das tipologias de tratamento nas ETEs brasileiras.....	10
Figura 6: Fluxograma do procedimento seguido para realização do trabalho.....	18
Figura 7: Fluxograma simplificado do processo de tratamento adotado na ETE.....	20
Figura 8: Figura esquemática das operações unitárias constituintes do pré-tratamento da estação de tratamento de esgoto em estudo. ....	21
Figura 9: Figura esquemática dos reatores de lodos ativados com aeração prolongada da estação de tratamento de esgoto em estudo. ....	22
Figura 10: Figura esquemática dos decantadores da estação de tratamento de esgoto em estudo. ....	23
Figura 11: Resultado das análises de DQO do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020.....	24
Figura 12: Resultado das análises de DBO <sub>5</sub> do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020.....	24
Figura 13: Resultado das análises de Nitrogênio do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020.....	25
Figura 14: Resultado das análises de Fósforo do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre janeiro de 2016 e junho de 2021.....	26
Figura 15: Resultado das análises em relação à eficiência de remoção de Fósforo no tratamento estudado em comparação com a eficiência exigida pela resolução CONSEMA 355/2017, no período entre janeiro de 2016 e junho de 2021. ....	26
Figura 16: Resultado das análises de SST do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre janeiro de 2018 e fevereiro de 2020. ....	27
Figura 17: Resultado das análises de Óleos e Graxas do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e junho de 2017. ....	28

Figura 18: Resultado das análises de pH do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020. ....	28
Figura 19: Resultado das análises de Sólidos Sedimentáveis do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro 2020. ....	29
Figura 20: Resultado das análises de Surfactantes do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e junho de 2017. ....	29
Figura 21: Resultado das análises de Coliformes Termotolarentes do esgoto tratado em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020. ....	30
Figura 22: Resultado das análises de remoção de Coliformes Termotolerantes no tratamento em comparação com a eficiência exigida pela resolução CONSEMA 355/2017, no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020. ....	31
Figura 23: a) Floco biológico e bactérias filamentosas no lodo biológico e b) Diversidade de microrganismos (M) e floco biológico do lodo. ....	32
Figura 24: a) Amostra de lodo ativado após uma hora de decantação e b) após 3 horas de decantação. ....	33
Figura 25: Processo de tratamento de esgotos proposto para a ETE em estudo. ....	35
Figura A1: Figura esquemática da estação de tratamento de esgoto em estudo. ....	43

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Padrões de atendimento para lançamento de efluente segundo a CONSEMA 355/2017, para esgotos sanitários com vazão superior a 10.000 m <sup>3</sup> /dia. ....	11
<b>Tabela 2:</b> Concentrações de nitrogênio no esgoto bruto. ....	14
<b>Tabela 3:</b> Identificação da microfauna observada no lodo ativado utilizado no tratamento. ....	31
<b>Tabela 4:</b> Parâmetros apresentados pelo esgoto durante o processo de testagem dos coagulantes. ....	34
<b>Tabela 5:</b> Concentrações de fósforo obtidas após teste de coagulação com os coagulantes sulfato de alumínio, cloreto férrico e Ecofloc PC 300 nas respectivas concentrações. ....	34
<b>Tabela 6:</b> Resultados dos testes de determinação do volume ótimo de cloreto férrico 3,8% para tratamento de fósforo. ....	34



## SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivos	1
2	Revisão Bibliográfica e princípios teóricos	2
2.1	Operações Unitárias do Tratamento de Esgotos	2
a)	Gradeamento	3
b)	Desarenação	3
c)	Reator de Lodos Ativados	4
i.	Aeração Convencional	4
ii.	Aeração Prolongada	4
d)	Decantação	5
e)	Lagoas de Estabilização	5
f)	Reatores Anaeróbios	6
2.2	Tratamento de Efluentes Domésticos no Brasil	6
2.3	Legislação Aplicável sobre o Tratamento de Esgoto	11
2.4	Principais Parâmetros do Esgoto Doméstico	13
2.4.1	Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO <sub>5</sub> )	13
2.4.2	Demanda Química de Oxigênio (DQO)	13
2.4.3	Fósforo	13
2.4.4	Nitrogênio	14
2.4.5	Sólidos Suspensos Totais e Sólidos Sedimentáveis (SST e SSed)	15
2.4.6	Surfactantes	15
2.4.7	Óleos e Graxas	16
2.4.8	Potencial Hidrogeniônico (pH)	16
2.4.9	Coliformes Termotolerantes	16
3	Materiais e Métodos	17
3.1	Análise de microfauna do lodo ativado	18
3.2	Análise de eficiência de remoção de fósforo a partir de coagulantes	18
4	Estudo de caso de uma estação de tratamento de esgoto de Porto Alegre	20
4.1	Processo de Tratamento de Esgoto	20
4.2	Parâmetros de Qualidade do Tratamento do Esgoto	23
5	Resultados	24
5.1	Avaliação do histórico dos parâmetros do efluente	24
5.2	Avaliação de Microfauna do Lodo Ativado	31
5.3	Avaliação da eficiência de tratamento quanto a remoção de fósforo	33
5.4	Proposta de melhoria	35
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	37
	REFERÊNCIAS	38



## 1 Introdução

O crescimento populacional e seu conseqüente aumento de densidade em grandes centros urbanos vivenciados nos últimos anos traz consigo uma série de conseqüências, sobretudo ambientais. Dentre eles, podemos destacar o aumento da geração de esgotos domésticos, os quais são fontes de contaminação de recursos hídricos quando não recebem o tratamento adequado.

Segundo Mortatti et al. (2012), o lançamento irregular de esgotos domésticos brutos é um dos principais causadores de poluição e contaminação de rios e mananciais, com efeitos sobre a qualidade das águas e impactos significativos nos ecossistemas aquáticos. Um dos principais impactos causados é a eutrofização, que é definida como o crescimento excessivo de algas no corpo hídrico, ocasionando uma diminuição no oxigênio dissolvido. A eutrofização ocorre devido ao excesso de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, provenientes de descargas de esgotos domésticos não tratados (Brasil e Ambiental, 2008).

Entretanto, visando minimizar os impactos ao meio ambiente, o aumento da geração dos esgotos domésticos também é acompanhado pelo crescente número de estações de tratamento de esgotos no Brasil. Nesse contexto, destaca-se a importância de se atingir a eficiência dos sistemas de tratamento de esgotos adotados.

O objetivo desse trabalho é realizar um estudo de caso sobre uma estação de tratamento de esgoto (ETE) no município de Porto Alegre, avaliando seus resultados de eficiência no tratamento e propondo melhorias no processo. Por conseguinte, realizar uma revisão bibliográfica sobre o processo de tratamento de esgoto, seus principais parâmetros e um panorama sobre as estações de tratamento de esgotos brasileiras.

### 1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência do processo de tratamento de uma estação de tratamento de esgoto de Porto Alegre e, com base nos dados apresentados, propor melhorias em seu processo.

Os objetivos específicos constituem-se em:

- a) Avaliar os parâmetros DQO, DBO, nitrogênio, fósforo, SST, óleos e graxas, pH, sólidos sedimentáveis, surfactantes e coliformes termotolerantes da estação de tratamento de esgoto estudada entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020, assim como analisar a sedimentabilidade do lodo e sua microfauna;
- b) Relacionar a estrutura física da ETE e sua eficiência de tratamento, em comparação com a legislação;
- c) Testar a eficiência de remoção de fósforo por coagulantes;
- d) A partir das informações obtidas, elaborar uma proposta de melhoria para a estação de tratamento de esgoto estudada.

## 2 Revisão Bibliográfica e princípios teóricos

O presente capítulo apresenta os principais tópicos necessários para o melhor entendimento deste trabalho. Os assuntos encontram-se divididos de forma organizada a fim de detalhar os processos geralmente utilizados nas estações de tratamento de esgotos, bem como compreender os principais parâmetros de monitoramento do mesmo e indicadores do processo. Além disso, é apresentado um panorama da situação das estações de tratamento de esgoto no Brasil e da legislação vigente sobre o lançamento de efluentes em águas superficiais.

### 2.1 Operações Unitárias do Tratamento de Esgotos

As operações unitárias empregadas para a remoção de substâncias indesejáveis do esgoto ou para a transformação dessas substâncias em outras de forma aceitável forma o processo de tratamento de esgoto. A remoção dos poluentes no tratamento, visando adequar o efluente a uma qualidade desejada ou padrão de qualidade definido em legislação, está associada aos conceitos de nível e eficiência do tratamento (COPASA, 2021).

O tratamento de esgotos divide-se, de forma genérica, em quatro macro etapas (ou níveis) (Gaspar et al., 2017; Jordão e Pessoa, 2005; Von Sperling, 1996b):

- Tratamento preliminar: composto por etapas como gradeamento e desarenação, o objetivo é remover sólidos grosseiros do efluente, preparando-o para as etapas posteriores;
- Tratamento primário: tratamento físico-químico que tem por finalidade a remoção de sólidos dissolvidos em suspensão, ânions e cátions presentes na solução;
- Tratamento secundário: também conhecido como tratamento biológico, objetiva a remoção da matéria orgânica dissolvida e em suspensão via reações bioquímicas aeróbias e anaeróbias;
- Tratamento terciário: remove compostos específicos não biodegradáveis, componentes tóxicos ou poluentes não biodegradados não removidos nas etapas anteriores.

As macro etapas às quais o esgoto pode ser submetido para tratamento, bem como o objetivo resumido de cada uma são apresentadas de forma esquemática na Figura 1.

Figura 1: Macro etapas do tratamento de esgotos e seus respectivos objetivos.



Fonte: Chiavelli et al. (2019)

Torna-se importante observar que todos os processos sejam realizados respeitando o controle de parâmetros de operação de cada uma, pois assim garante-se a eficiência para a remoção dos parâmetros em cada etapa. As macro etapas são formadas por uma sequência de operações unitárias, as quais são apresentadas a seguir:

*a) Gradeamento*

A operação de gradeamento constitui-se normalmente como etapa inicial dos processos de tratamento. A operação baseia-se na utilização de uma grade com aberturas de dimensões uniformes para reter sólidos grandes contidos no efluente. Sua função principal é remover materiais grosseiros que podem vir a danificar ou obstruir equipamentos subsequentes, causar contaminação nas tubulações ou reduzir a eficiência e a confiabilidade do processo em geral (Metcalf, 2016).

As principais características de uma unidade de remoção de sólidos grosseiros por gradeamento, segundo Jordão e Pessoa (2005), são:

- Espaçamento entre as barras: as grades são classificadas em finas, médias e grosseiras, de acordo com o tipo de material que se deseja reter;
- Dimensões das barras: as barras deverão ser suficientemente robustas para suportar os impactos e os esforços da operação;
- Inclinação das barras: as barras podem ser instaladas inclinadas ou na vertical. Esta inclinação varia entre 30° e 45° para grades grosseiras e 45° a 60° para grades médias e finas. As inclinações citadas geralmente são utilizadas em grades de limpeza manual, e inclinações maiores que 60° são utilizadas para grades de limpeza mecanizada contínua;
- Forma das barras: normalmente as barras são retas, mas existem grades de barras curvas com limpeza mecanizada através de ancinho giratório. As barras também podem variar entre seção retangular, seção com arestas arredondadas ou seção circular;
- Material das barras: sistemas antigos utilizavam ferro fundido como material das grades, entretanto, pelo intenso ataque químico, este material foi substituído por aço inoxidável, alumínio, fibra de vidro e plásticos especiais, que possuem maior resistência à degradação química e são mais leves;
- Dispositivos de limpeza: basicamente, a limpeza do equipamento pode ser manual, utilizada principalmente em estações de pequeno porte ou de grande porte se o espaçamento entre as barras for grande, ou mecanizada, utilizada em estações de médio a grande porte ou em sistemas com pequeno espaçamento entre as barras.

*b) Desarenação*

Segundo Tomiello (2008), a finalidade da remoção de areia é eliminar ou diminuir os efeitos adversos no funcionamento das partes componentes das instalações à jusante, bem como os impactos nos corpos receptores devido ao assoreamento.

A separação de areia, desarenação, do esgoto é uma operação unitária baseada no processo de sedimentação, onde o dispositivo é projetado para separar fisicamente a areia das demais partículas mais leves. As caixas de areia utilizadas no projeto da estação, do tipo retangular com escoamento horizontal, são projetadas para manter o fluxo em uma velocidade próxima a 0,3 m/s, proporcionando assim o tempo necessário para que haja a separação. O principal critério para o projeto desse tipo de caixa de areia é que, mesmo sob situações adversas, a partícula mais leve de areia sedimente o até atingir o fim do canal. O comprimento do canal é governado pela profundidade requerida, pela velocidade de sedimentação e pela seção de controle e, a seção transversal, governada pela vazão e número de canais (Metcalf, 2016).

### *c) Reator de Lodos Ativados*

O sistema de lodos ativados é amplamente utilizado em situações em que são necessários uma elevada quantidade de efluente e há pouca área disponível para utilização no tratamento de despejos domésticos e industriais. Durante o tratamento, ocorrem reações bioquímicas para remoção de matéria orgânica e, em alguns casos, de matéria nitrogenada, onde a biomassa utiliza o substrato presente no efluente para se desenvolver (Von Sperling, 2012).

A recirculação de lodo faz com que a concentração de sólidos suspensos no tanque de aeração seja mais de dez vezes superior à de uma lagoa aerada de mistura completa, sem recirculação. Isso implica em um baixo tempo de detenção do líquido, sendo na ordem de horas, o que também resulta em um volume do tanque de aeração bastante reduzido. Já os sólidos, devido a recirculação, permanecem no sistema por um tempo superior ao do líquido, sendo esse período denominado de idade do lodo. A maior permanência dos sólidos no sistema de lodos ativados garante uma elevada eficiência, uma vez que há tempo suficiente para a biomassa metabolizar toda a matéria orgânica dos esgotos (Von Sperling, 2012).

O reator de lodos ativados pode ter dois tipos de aeração:

#### *i. Aeração Convencional*

Em um processo de aeração convencional, a fim de se economizar energia para a aeração e reduzir o volume do reator biológico, é inserido um decantador primário à montante no processo para que parte da matéria orgânica seja previamente tratada. No sistema convencional, o tempo de detenção hidráulica no reator é na ordem de 6 a 8 horas, enquanto a idade do lodo é de 4 a 10 dias (Von Sperling, 2012).

O processo de sedimentação primária é mais eficiente para remoção de sólidos sedimentáveis, e o processo ocorre em reator biológico para remoção de substâncias orgânicas solúveis, coloidais e em suspensão, para a remoção do fósforo e para nitrificar e desnitrificar o efluente (Metcalf, 2016).

#### *ii. Aeração Prolongada*

A aeração prolongada acontece em caso de permanência da biomassa por um período de 18 a 30 dias, recebendo a mesma carga de DBO do esgoto bruto que o sistema convencional, ocasionando uma menor disponibilidade de alimento para as bactérias. A quantidade de biomassa é maior que no sistema de lodos ativados convencional, o tempo de detenção do líquido é na faixa de 16 a 24 horas e o volume do reator aeróbio também é maior. Sendo assim,

há uma menor quantidade de matéria orgânica por unidade de volume do tanque de aeração e também por unidade de biomassa do reator, resultando que as bactérias passem a utilizar de forma mais intensa no seu metabolismo a própria matéria orgânica componente das suas células, convertendo-a em gás carbônico e água através da respiração. Por conta disso, ocorre uma estabilização da biomassa no próprio tanque de aeração. O consumo de oxigênio adicional para estabilização do lodo é bastante significativo, podendo ser maior que o próprio consumo para metabolizar o material orgânico do afluente (Von Sperling, 2012).

A reduzida disponibilidade de alimento e sua total assimilação fazem com que a aeração prolongada seja a variante de lodos ativados com a maior eficiência de remoção de DBO, no entanto, a eficiência de qualquer variante do processo está associada ao desempenho do decantador secundário. Em caso de perda de sólidos no efluente final, haverá uma grande deterioração na qualidade do efluente, anulando o bom desempenho do tanque de aeração na remoção de DBO (Von Sperling, 2012).

#### *d) Decantação*

O desempenho da decantação secundária no tratamento por lodos ativados é fundamental na performance do sistema de tratamento biológico, assim como também para a produção de um efluente com a menor concentração de sólidos suspensos possível (Filho, 1993).

Os tanques de decantação secundária têm por função a produção de um efluente clarificado e o espessamento do lodo, para fornecer uma maior concentração de sólidos para o retorno aos tanques de lodos ativados ou para seu tratamento. Tanto a clarificação quanto o espessamento são levados em conta no projeto, sendo a clarificação regida pela velocidade de sedimentação das partículas e o espessamento regido pelo fluxo de massa de sólidos onde ocorre a decantação em zona (Davis, 2017).

Segundo Stukenberg et al. (1983), os principais problemas operacionais relatados sobre o sistema de decantação são a presença de sólidos suspensos no sobrenadante -como resultado da desnitrificação do lodo-, a perda de sólidos suspensos no efluente e a produção de um lodo biológico numa concentração inferior à desejada.

#### *e) Lagoas de Estabilização*

Segundo Von Sperling (1996a), os sistemas compostos por lagoas de estabilização constituem-se na forma mais simples para o tratamento de esgotos, tendo como principal objetivo a remoção de matéria carbonácea.

As lagoas de estabilização podem ser classificadas como aeróbias, facultativas e anaeróbias tomando como base a natureza da atividade biológica e de fatores de projeto, tais como profundidade da lagoa, tempo de detenção, carga orgânica e a qualidade do efluente, fatores que variam de acordo com o tipo de lagoa. As lagoas podem ser classificadas também como lagoas de maturação, quando também houver o objetivo da remoção de organismos patogênicos (Qasim e Chiang, 2017; Rocha, 2005).

O grau de tratamento é função da quantidade de lagoas dispostas em série e do tempo de detenção hidráulica do esgoto em cada lagoa (Horan, 1990).

### *f) Reatores Anaeróbios*

Os reatores anaeróbios normalmente são sistemas simples, de fácil construção e operação. Esse sistema de tratamento apresenta alta eficiência na remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica, além de apresentar as vantagens de ocupar pequenas áreas, produzir pouco lodo e já estabilizado e consumir pouca energia elétrica, uma vez que não necessita de estruturas com aparelhos elétricos (Campos et al., 1999; Teixeira, 2009).

Os reatores anaeróbios apresentam desvantagem quando o efluente é rico em nutrientes eutrofizantes como nitrogênio e fósforo, uma vez que não remove satisfatoriamente esses parâmetros. Além disso, também é um tratamento ineficiente para organismos patogênicos, mas em certos casos é o suficiente para resolver problemas causados pelos esgotos, dependendo da classe do corpo hídrico receptor, ou podem ser utilizados como pré-tratamento para unidades mais eficientes (Campos et al., 1999; Teixeira, 2009).

## **2.2 Tratamento de Efluentes Domésticos no Brasil**

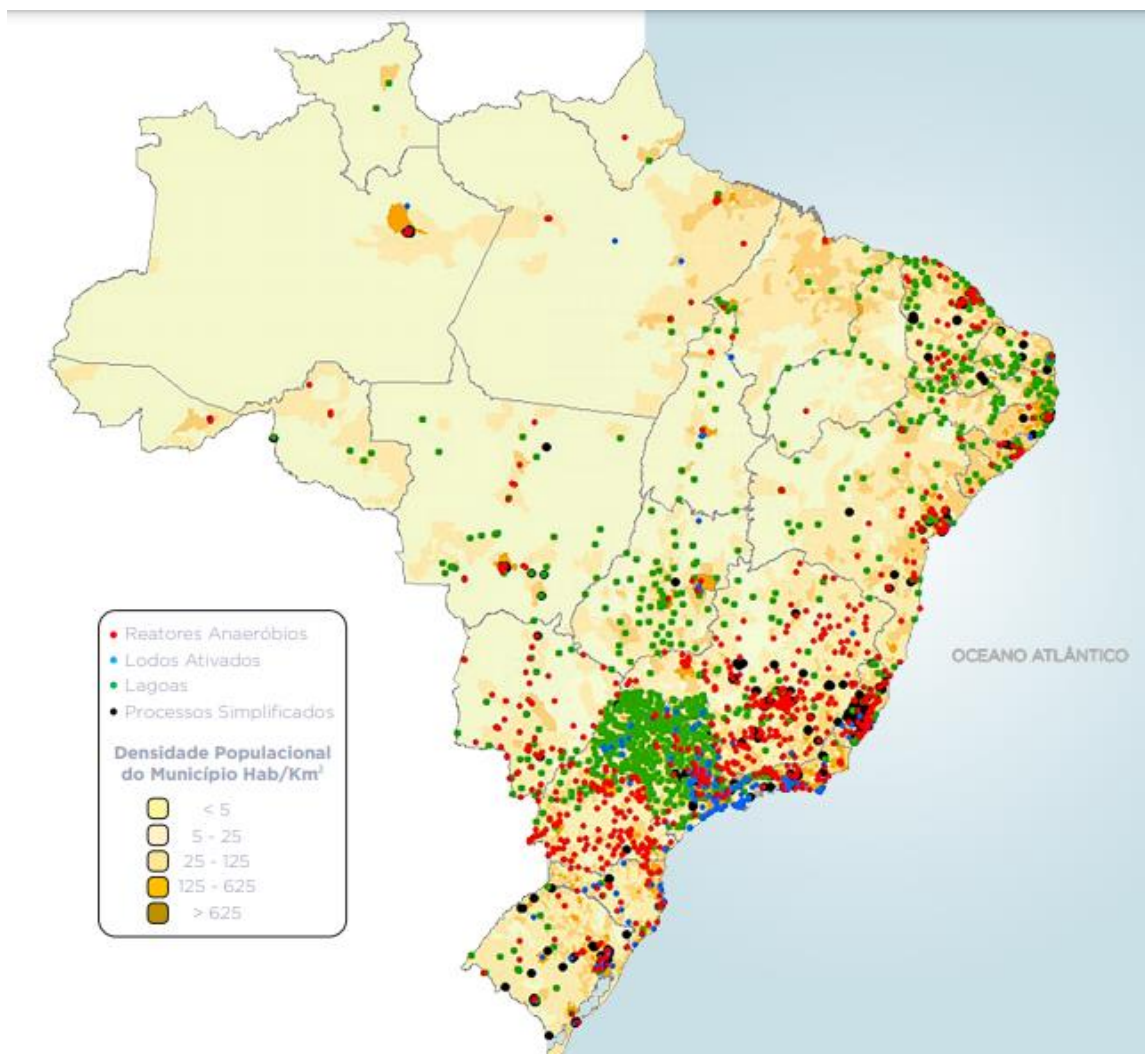
O Brasil é um país extenso e populoso, com densidade demográfica não uniformemente distribuída. Devido às condições técnicas inerentes a cada processo de tratamento de esgoto, por aspectos regionais e por não existir uma padronização do processo, existem diferenças entre os sistemas de tratamento adotados pelos municípios. Entretanto, alguns processos unitários destacam-se e são mais comumente utilizados, como fossas sépticas, tanques de aeração, lagoas de estabilização, reatores anaeróbios, lodos ativados e filtros (ANA, 2020).

Segundo o Diagnóstico Nacional dos Serviços de Água e Esgotos (Brasil et al., 2019), apenas 49,1% da vazão de esgoto gerada no Brasil é tratada. Esse número representa um aumento de 8,3 pontos percentuais em relação ao mesmo diagnóstico referente ao ano de 2016 (Brasil et al., 2016), evidenciando a tendência de crescimento do acesso ao saneamento básico no país e, conseqüentemente, da demanda pelos sistemas de tratamento necessários.

Na Figura 2, pode ser observada a distribuição das 3.668 estações de tratamento de efluentes mapeadas em 2.007 municípios brasileiros, classificadas de acordo com sua tipologia de tratamento em 2017.



Figura 2: Mapa de distribuição das estações de tratamento de efluentes no Brasil em 2017 separadas por conjunto de tipologias.



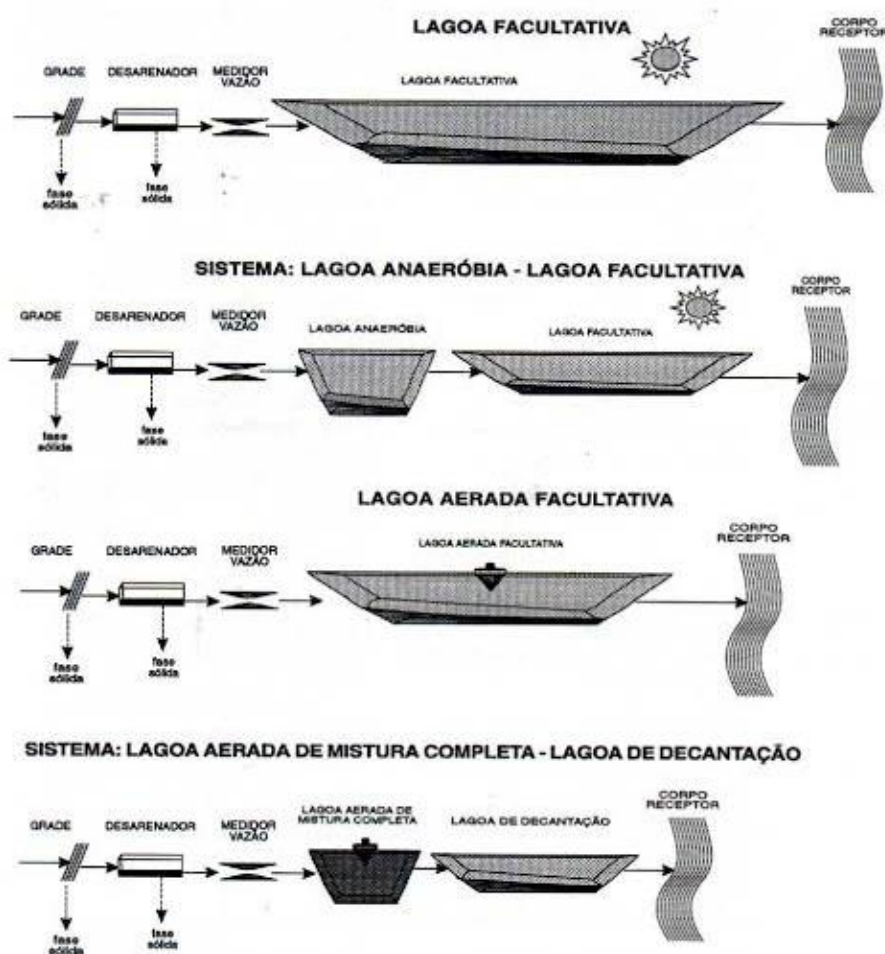
Fonte: (ANA, 2020)

Como apresentado no item 2.1, existe uma série de operações unitárias e processos que podem ser aplicados ao tratamento de esgotos. De forma geral, as estações de tratamento de esgoto buscam a remoção de poluentes e patógenos a fim de que o esgoto gerado possa retornar aos recursos hídricos em acordo com a legislação vigente no que se refere à qualidade da água. Assim, dependendo das características do esgoto a ser tratado, um maior ou menor número de operações unitárias deve ser implementado a fim de garantir a qualidade do tratamento. Ainda, fatores econômicos e populacionais também interferem no estabelecimento da sequência das técnicas de tratamento.

Desta forma, existem estações de tratamento de esgotos mais simples e outras mais complexas. Entre as estações de tratamento mapeadas na Figura 2, um percentual dessas utiliza processos de tratamento simplificados, com pouca mecanização e eficiência de tratamento limitada. As estações de tratamento mais simples são formadas por fossas sépticas seguidas ou não de filtros anaeróbios e as Estações de Pré-Condicionamento, ou EPCs. Esse grupo representa aproximadamente 11% do montante total (ANA, 2020).

Para instalações de pequeno porte, os sistemas de lagoas de estabilização são especialmente aplicados, tendo em vista a menor demanda operacional – majoritariamente associada às operações de limpeza- e a maior disponibilidade de área em municípios pequenos, com populações de até 10 mil habitantes, destacando-se os sistemas compostos por tanque séptico e filtro anaeróbio (Chernicharo et al., 2018). Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2020), essa categoria de tratamento também inclui os sistemas de lagoas, compostos por uma lagoa anaeróbia seguida de uma lagoa facultativa ou de maturação e das lagoas facultativa e anaeróbia utilizadas isoladamente, sendo o grupo descrito responsável por um total de 35,2% do total das ETEs brasileiras.

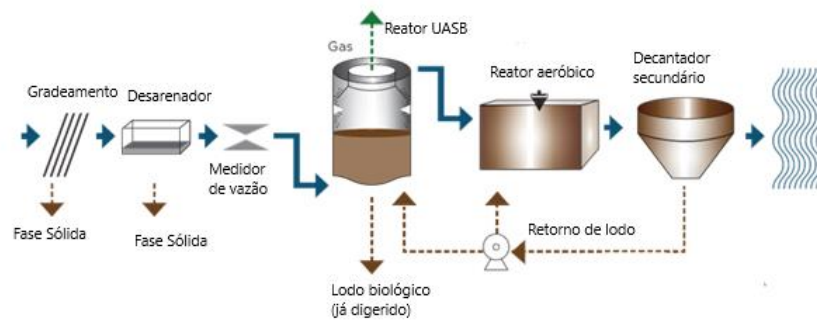
Figura 3: Fluxograma qualitativo dos principais sistemas de lagoas de estabilização.



Fonte: Adaptado de Von Sperling (1996a).

O sistema de tratamento mais utilizado, segundo ANA (2020), é o processo contendo reatores anaeróbios, presente em 1.373 unidades, podendo ser utilizados desde o pré-tratamento para outros processos até o seu uso isolado. Em geral, é recomendado que etapas adicionais sejam inseridas ao processo de tratamento com o objetivo de melhorar a qualidade do efluente final, visto que muitas vezes não atendem os requisitos impostos pela legislação. Os principais problemas apresentados pelo efluente final desse tipo de tratamento são o baixo nível de oxigênio dissolvido, a DBO e o alto nível de partículas em suspensão. Os possíveis sistemas subsequentes aos reatores anaeróbios para sanar tais problemas são os filtros (anaeróbios e aeróbios), lodos ativados, sistemas de lagoas ou decantadores finais.

Figura 4: Fluxograma qualitativo de um sistema de tratamento contendo um reator anaeróbico UASB para uma ETE genérica.



Fonte: Adaptado de Urban Wastewater treatment in Brazil. Von Sperling, 2016. IDB Technical note 970.

Para localidades onde há uma grande população a ser atendida pelo sistema de tratamento de esgotos, destaca-se o processo de lodos ativados, estando presente em aproximadamente 10% das ETEs. Eles são bastante complexos e mecanizados, necessitando de manutenção e operação especializada, mas apresentam elevada eficiência de remoção de matéria orgânica e de nutrientes como nitrogênio e fósforo. Eles podem ser implantados em áreas bem inferiores às necessárias para o sistema de lagoas e operar em regime de fluxo contínuo ou intermitente (ANA, 2020).

Além do sistema de lodos ativados, a combinação de processos biológicos com processos químicos também apresenta uma elevada eficiência na remoção de poluentes. No geral, esses processos são bastante estáveis e se complementam, melhorando a performance e produzindo efluentes de boa qualidade. A concepção desse grupo consiste na combinação de um reator anaeróbico seguido de um tratamento químico como a flotação, decantação ou filtração e, em geral, a adição dos processos químicos contribui com a estabilidade e a melhoria do tratamento, uma vez que o processo biológico é mais sensível às variações das características do ambiente e do esgoto bruto (ANA, 2020).

Na Figura 5, podem ser observadas as proporções das tipologias de tratamento no Brasil, segundo ANA (2020). A categoria Situações Especiais representa as ETEs que não tiveram seus dados validados ou estão inativas e a categoria Miscelânea representa as ETEs que trabalham com outras metodologias ou a junção das supracitadas.

Figura 5: Distribuição percentual das tipologias de tratamento nas ETEs brasileiras.



Fonte: Adaptado de ANA (2020).

A falta de tratamento dos esgotos contribui de maneira significativa em impactos ambientais na maioria das cidades, pois quando não possuem sistema de tratamento adequado e são lançados clandestinamente na rede pluvial, acabam escoando para os rios, reduzindo as condições de saúde pública e a qualidade de vida da população (Tucci, 2005). A crescente populacional observada ao longo dos anos tem como consequência o aumento da produção de efluentes domésticos, ricos em matéria orgânica, que em grande parte das vezes são despejados sem tratamento em corpos hídricos (Martins et al., 2018).

Segundo ANA (2012), o lançamento de esgoto *in natura* nos corpos hídricos gera contaminação e poluição, podendo trazer como consequências:

- Diminuição do oxigênio dissolvido (OD) devido sua utilização por bactérias aeróbias na oxidação da matéria orgânica;
- Toxicidade aos organismos aquáticos devido à presença de metais pesados;
- Maior demanda de produtos químicos para o tratamento da água;
- Eutrofização do corpo hídrico favorecida pela presença de nutrientes, principalmente fósforo e nitrogênio.

A eutrofização, processo de poluição de corpos hídricos que acabam adquirindo coloração turva, oferece boas condições para o crescimento de macrófitas aquáticas, o que provoca uma reação de quebra de estabilidade no ecossistema. As macrófitas aquáticas produzem uma elevada quantidade de biomassa, o que aumenta ainda mais o déficit de oxigênio no meio e, com isso, cria condições para a formação de gases nocivos à vida aquática e é responsável pelo baixo pH do meio (Esteves, 1988).

O desequilíbrio causado pelos despejos de esgotos também dificulta o processo de autodepuração do corpo hídrico, que pode ser compreendido como um processo de recuperação no qual o corpo d'água tende a retornar às características anteriores ao lançamento do efluente através de mecanismos naturais. Quando incapaz de realizar a autodepuração, o consumo de oxigênio torna-se comprometido devido à diminuição do OD, gerando impactos significativos tanto ao meio ambiente quanto ao ser humano (Martins et al., 2018).

Ressalta-se ainda que há a possibilidade de transmissão de doenças pelos microrganismos presentes no esgoto, como a febre tifoide, a febre paratifoide, as shigeloses, a cólera, a hepatite A, amebíase, giardíase, leptospirose, poliomielite, ancilostomíase (amarelão), ascariíase (lombriga), teníase, cisticercose, filariose (elefantíase) e esquistossomose. Tais microrganismos refletem diretamente no nível de saúde pública da população, uma vez que grande parte das doenças de veiculação hídrica são provenientes da água de má qualidade que recebe cargas de esgotos sanitários. A capacidade de uma água transmitir doenças pode ser medida através dos organismos indicadores de contaminação fecal, sendo os principais os do grupo de coliformes (Junior et al., 2017; Von Sperling, 1996b).

### 2.3 Legislação Aplicável sobre o Tratamento de Esgoto

Tendo em vista a necessidade da preservação ambiental, da saúde pública e dos recursos naturais, previamente ao despejo de um efluente, seja ele doméstico ou industrial, em um corpo hídrico há a necessidade de serem realizadas análises de diversos parâmetros do efluente, para que seja feita uma caracterização e assim possam ser estabelecidos limites (Brasil, 2017).

As legislações vigentes que dissertam sobre o lançamento de efluentes podem ser a nível nacional e regional. A nível nacional, as resoluções que dispõem sobre os limites de lançamento são a CONAMA Nº 357, de 17 de março de 2005 e a CONAMA Nº 430, de 13 de maio de 2011. No Rio Grande do Sul, a legislação aplicável para lançamento de efluentes tratados em recursos hídricos é a Resolução CONSEMA Nº 355, de 13 de julho de 2017, que dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado.

A licença ambiental da ETE pode ser mais restritiva que esses padrões estabelecidos na legislação, caso o órgão ambiental entenda necessário. Na Tabela 1 estão demonstrados os padrões de atendimento constantes na CONSEMA 355/2017 para esgoto sanitário.

**Tabela 1:** Padrões de atendimento para lançamento de efluente segundo a CONSEMA 355/2017, para esgotos sanitários com vazão superior a 10.000 m<sup>3</sup>/dia.

Parâmetro	Padrão de emissão
Alumínio (mg/L)	10
Cádmio (mg/L)	0,1

---

Cobre (mg/L)	0,5
Chumbo (mg/L)	0,2
Coliformes termotolerantes (NMP/100mL)	1000 ou 95% eficiência
Cor	Ausente
Cromo total (mg/L)	0,5
DBO (mg/L)	40
DQO (mg/L)	150
Espumas	Ausentes
Estanho (mg/L)	4,0
Ferro total (mg/L)	10
Fósforo total (mg/L)	1,0 ou 75% de eficiência
Materiais Flutuantes	Ausentes
Mercúrio total (mg/L)	0,01
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	20
Níquel (mg/L)	1,0
Odor	Ausente
Óleos e graxas minerais (mg/L)	<10,0
pH	Entre 6 e 9
Prata (mg/L)	0,1
Sólidos Sedimentáveis (mg/L)	<=1,0
Subst. tensoativas reag. azul metileno (mg/L)	2,0
Zinco (mg/L)	2,0
Temperatura (°C)	<40

---

## 2.4 Principais Parâmetros do Esgoto Doméstico

O funcionamento adequado de uma estação de tratamento de efluentes é indicado pela sua eficiência de remoção dos poluentes, caracterizadas através de análises físico-químicas (Silva et al., 2017).

### 2.4.1 Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO<sub>5</sub>)

A DBO<sub>5</sub> é um indicador que determina a concentração de matéria orgânica biodegradável através da demanda de oxigênio exercida pela respiração de microrganismos. A medida é realizada à temperatura constante de 20°C durante um período de incubação de 5 dias, visando retratar em laboratório o fenômeno que aconteceria em um corpo hídrico. A DBO<sub>5</sub> é um parâmetro estimativo, uma vez que as condições naturais não são consideradas em sua totalidade (VALENTE et al., 1997).

Segundo FUNASA (2020), a DBO<sub>5</sub> dos esgotos domésticos varia entre 100 mg/L e 300 mg/L, sendo essa a quantidade necessária de oxigênio necessária para estabilizar bioquimicamente a matéria orgânica presente no esgoto, e quanto maior o valor de DBO, maior a poluição orgânica.

A DBO<sub>5</sub> de águas residuais ocorre principalmente por conta de três classes de compostos: o nitrogênio oxidável, os compostos redutores químicos e a matéria orgânica carbonácea, responsável por praticamente a totalidade da demanda de oxigênio dos esgotos domésticos. (Mendonça et al., 2017).

### 2.4.2 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A DQO, assim como a DBO<sub>5</sub>, é um indicador que determina a concentração de matéria orgânica presente no efluente, entretanto, o parâmetro se refere tanto à matéria orgânica biodegradável quanto à não biodegradável. A estimativa do parâmetro é realizada em meio ácido e condições energéticas pela ação de um forte agente oxidante. (Scalize et al., 2004; VALENTE et al., 1997).

Os valores apresentados pela DQO normalmente são superiores aos apresentados pela DBO, pois o esgoto sanitário normalmente possui matéria orgânica não susceptível à degradação biológica. Sendo assim, o esgoto bruto que possui uma relação entre DBO e DQO superior a 0,5 indica que o efluente é altamente biodegradável, ou seja, facilmente tratado por processos biológicos. Caso o efluente apresente a relação DBO/DQO inferior a 0,3, há o indício da baixa susceptibilidade de o esgoto sofrer degradação biológica (Lopes, 2015).

### 2.4.3 Fósforo

Segundo Sedlak (1991), o fósforo se apresenta nos esgotos na forma de fosfato. Suas principais formas são o ortofosfato e o polifosfato, em sua forma inorgânica, e o fósforo orgânico.

A forma com que os ortofosfatos apresentam-se na água depende do pH do meio, sendo elas o  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , sendo a forma predominante o  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Já os polifosfatos são moléculas mais complexas, que possuem dois ou mais átomos de fósforo e podem ser convertidos a ortofosfatos via hidrólise (Von Sperling, 2012).

A remoção de fósforo em estações de tratamento de efluentes pode ocorrer tanto por processos biológicos quanto por processos físico-químicos, mediante a adição de sais de alumínio ou ferro. Quanto aos processos físico-químicos, sua grande vantagem é a grande flexibilidade, podendo ser adaptado facilmente a unidades já existentes. Já os processos biológicos tendem a apresentar uma maior complexidade operacional, uma vez que são altamente dependentes do comportamento da biomassa, das condições ambientais no reator e das características do afluente (Marais et al., 1983; Marguti et al., 2008; Mulkerrins et al., 2004).

Para realizar a remoção biológica de fósforo, é essencial que existam zonas aeróbias e zonas anaeróbias na linha de tratamento, pois os organismos acumuladores de fósforo (OAP) necessitam desta alternância de condições para construir seus componentes internos de armazenamento de energia, moléculas orgânicas e polifosfatos (EPA, 1987; Henze et al., 2002; Sedlak, 1991). A remoção de fósforo por processos físico-químicos pode ocorrer via ozonização, precipitação química, eletrocoagulação ou separação por membranas. Para a precipitação química, na maioria dos casos é necessária a adição de compostos químicos que ou irão adsorver o fosfato ou formar precipitados de baixa solubilidade em água, tal como ocorre com os sais de alumínio, íon férrico, íon ferroso e cálcio. A remoção pela adição de sais de alumínio e ferro pode ocorrer pela formação de hidratos férricos ou hidróxidos de alumínio, compostos que servem como substrato para a adsorção do fosfato, incorporação em estruturas de óxidos hidratados, formação de fosfatos de cátions mistos ou a formação de fosfato férrico ou de alumínio (WEF, 2011, 1998).

#### 2.4.4 Nitrogênio

Segundo Von Sperling (2012), as formas predominantes do nitrogênio no esgoto bruto são o nitrogênio orgânico e a amônia, sendo estes determinados conjuntamente em laboratório pelo método Kjeldahl, constituindo assim o denominado Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK). A faixa de teores convencionais de nitrogênio nos esgotos encontra-se na Tabela 2.

**Tabela 2:** Concentrações de nitrogênio no esgoto bruto.

Parâmetro	Faixa de lançamento per capita (g/hab.dia)	Faixa de Concentração (mg/L)
Nitrogênio Total	6,0 – 10	35 - 60
Nitrogênio Orgânico	2,5 – 4,0	15 – 25
Amônia	3,5 – 6,0	20 – 35
Nitrito	0	0
Nitrato	0,0 – 0,2	0 - 1

Fonte: Von Sperling (1996).



As principais alternativas tecnológicas para o tratamento biológico do nitrogênio lançam mão do seu ciclo biogeoquímico, que se sustenta nos processos de nitrificação e desnitrificação (Philips, 2008). Segundo Zoppas et al. (2016), alguns parâmetros operacionais influenciam no processo de remoção biológica de nitrogênio. Para o processo de nitrificação, os principais fatores a serem atendidos são OD entre 1 e 3 mg/L (Colliver e Stephenson, 2000; Garrido et al., 1997), o pH entre 7,9 e 8,9 (Villaverde, 1997) e a alcalinidade (CaCO<sub>3</sub>) superior a 7,14 mg/mg NTK (Souza, 2019). Já a etapa de desnitrificação, por tratar-se de um processo anaeróbio, tem como condições operacionais que a região anóxica seja cerca de 1/3 da região aeróbia e o controle do retorno do lodo (Shams et al., 2018). Um aspecto fundamental para o sucesso deste processo é respeitar as relações de, no mínimo, DBO-N-P (100:5:1), para que possa ocorrer o desenvolvimento de bactérias decompositoras de matéria orgânica (CPHEEO, 2013).

#### 2.4.5 *Sólidos Suspensos Totais e Sólidos Sedimentáveis (SST e SSed)*

Os sólidos suspensos são aqueles que se descartados em ambiente aquático sem o devido tratamento podem levar ao desenvolvimento de depósitos de lodo e de condições anaeróbias. A medida destes parâmetros é utilizada rotineiramente na avaliação de desempenho e eficiência do tratamento do efluente, sendo utilizado como um indicador de controle do processo (Metcalf, 2016).

Por definição, segundo APHA (2012), os sólidos suspensos ficam retidos no filtro de tamanho nominal de 1,2 µm. Entretanto, sabe-se que o esgoto contém uma grande fração de sólidos coloidais com tamanho que varia entre 0,01 e 1 µm. O número de partículas coloidais contidas no esgoto bruto e após a sedimentação primária varia entre 10<sup>8</sup> e 10<sup>12</sup>/mL (Metcalf, 2016).

Os sólidos sedimentáveis são a porção de sólidos em suspensão que se sedimenta sob a ação da gravidade durante um período de uma hora, a partir de um litro de amostra mantida em repouso em um cone Imhoff. Os sólidos sedimentáveis constituem a parte mais grosseira dos sólidos suspensos e podem ser considerados indicadores de poluição.

#### 2.4.6 *Surfactantes*

Os surfactantes são compostos orgânicos que apresentam em sua molécula uma porção polar e outra apolar. A porção polar, também chamada de cauda, é formada por cadeias carbônicas, fluorocarbônicas ou siloxânicas, enquanto a porção apolar, também conhecida como cabeça, pode apresentar grupos iônicos, não iônicos ou anfóteros, podendo se comportar como ácido ou base de acordo com o pH do meio (Daltin, 2011; Felipe et al., 2017).

Quando adicionados a um solvente polar, os surfactantes se acumulam na superfície do solvente, ou seja, na superfície solvente/ar. A presença dos surfactantes diminui a força de coesão entre as moléculas do solvente, diminuindo a tensão superficial. Esse efeito causado pelos surfactantes faz com que, quando descartado indevidamente nos corpos hídricos, a taxa de evaporação da água diminua e a solubilidade de compostos orgânicos aumente. Além disso, os surfactantes formam uma espuma na superfície da água, o que diminui a penetração dos raios solares e reduz a solubilidade do oxigênio, causando a morte da fauna (Felipe et al., 2017).

#### 2.4.7 Óleos e Graxas

Óleos e graxas são substâncias orgânicas, geralmente hidrocarbonetos, gorduras ou ésteres, que podem ser de origem animal, mineral ou vegetal. Não são costumeiramente encontrados em águas naturais, mas podem ser provenientes de despejos de efluentes industriais ou de esgotos domésticos (Kich e Böckel, 2017). Em seu processo de decomposição, os óleos e graxas consomem o oxigênio dissolvido, elevando a DBO e a DQO do sistema e causando alterações negativas no ecossistema aquático (Metcalf, 2016).

Quando lançados nas redes de drenagem de águas residuais, os óleos e graxas poluem os meios receptores hídricos e podem provocar estragos nas estações de tratamento de esgoto. O óleo usado contém elevados níveis de hidrocarbonetos e de metais como ferro, chumbo, zinco, cobre, cromo, níquel e cádmio (Orssatto et al., 2010).

#### 2.4.8 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O potencial Hidrogeniônico (pH) é a medida do balanço ácido de uma solução, calculada a partir do logaritmo negativo da concentração de íons hidrogênio. A escala de pH varia de 0 a 14, sendo os valores de 0 a 7 indicadores de acidez da solução e valores de 7 a 14 indicadores de alcalinidade. O pH de um corpo hídrico pode variar tanto por fatores naturais, como dissolução de rochas, absorção de gases, oxidação da matéria orgânica e fotossíntese, quanto por fatores antropogênicos, como despejo de efluentes industriais e esgotos domésticos (Lopes e Júnior, 2010; Von Sperling, 1996b).

O pH dos corpos hídricos afeta diretamente o metabolismo da fauna aquática, pois alterações nos seus valores podem aumentar o efeito de substâncias químicas que são tóxicas, como os metais pesados. Por conta disso, é essencial que o descarte de efluentes e esgotos tratados apresentem pH na faixa de 6 a 9 (ANA, 2004).

#### 2.4.9 Coliformes Termotolerantes

Os coliformes termotolerantes são bactérias que ocorrem no trato intestinal de animais de sangue quente e são utilizadas como indicador de poluição por esgotos domésticos. Elas não são patogênicas, mas sua presença indica a possibilidade da existência de outros microrganismos patogênicos que são responsáveis pela transmissão de doenças de transmissão pela água, como desintéria bacilar, febre tifoide e cólera (ANA, 2004).

Segundo De Oliveira et al. (2015), a preocupação quanto ao nível de qualidade, contaminação das águas e manutenção dos recursos hídricos tem especial importância à medida que a água é destinada para o consumo humano ou para transformação econômica. A água não potável, ou seja, contaminada de alguma forma por agentes nocivos, pode pôr em perigo a saúde e comprometer o desenvolvimento humano.

### 3 Materiais e Métodos

A metodologia para elaboração deste trabalho constituiu-se na avaliação da eficiência do sistema de tratamento do esgoto de uma estação de tratamento de Porto Alegre de capacidade de 444 L/s ou 38.361,6 m<sup>3</sup>/dia. O estudo considerou, de forma geral, a infraestrutura da ETE existente, o sistema operacional utilizado e a eficiência do tratamento para atendimento aos padrões de emissão de esgotos exigidos pela legislação em vigor (CONSEMA 355/2017).

O trabalho foi estruturado em 4 etapas sequenciais: (1) coleta e tratamento de dados de análises da ETE, (2) análise do sistema atual de tratamento de esgoto, (3) análise dos dados obtidos e (4) proposta técnica de melhoria no sistema de tratamento.

As etapas (1) e (2) consistiram na coleta e tratamento dos dados (DQO, DBO<sub>5</sub>, nitrogênio, fósforo, SST, Óleos e Graxas, pH, sólidos sedimentáveis, surfactantes e coliformes termotolerantes) que serviram para o desenvolvimento do presente estudo e foram fornecidos pela administradora da estação. Durante o trabalho, foram realizadas vistorias técnicas guiadas na ETE a fim de averiguar as condições gerais do sistema de tratamento em relação à sua infraestrutura e sistema de operação atual.

Além das análises realizadas pela empresa administradora da estação, também foram realizados testes de jarros para avaliar o melhor coagulante a ser utilizado para remoção de fósforo e análise de microfauna no lodo ativado para avaliação da tratabilidade e operação do sistema, além de análises de outros trabalhos da literatura já realizados sobre o tema. A partir do diagnóstico elaborado, realizou-se um levantamento dos pontos problemáticos identificados e elencaram-se melhorias sugeridas para saná-los.

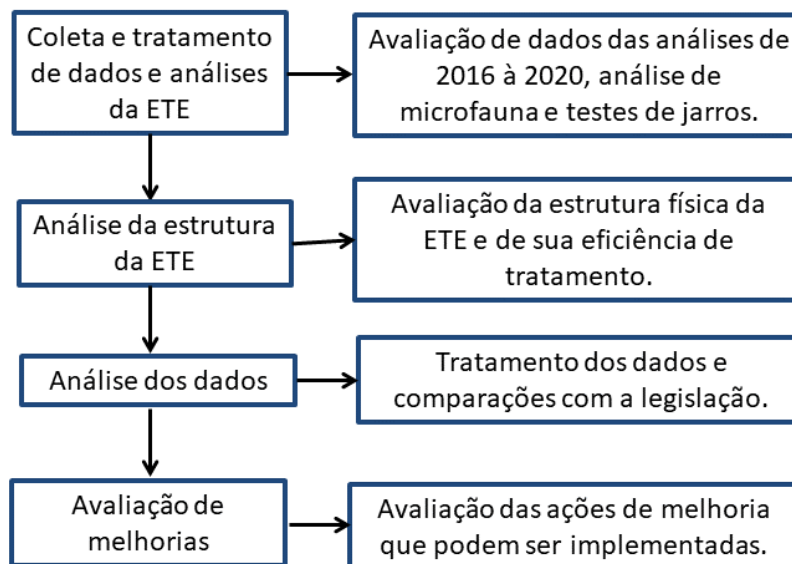
Nas etapas (3) e (4), os dados obtidos foram analisados e compilados para servirem de base para o diagnóstico. Fez-se uma avaliação minuciosa tanto da estrutura física da ETE, quanto da forma operacional e, principalmente, quanto à avaliação de sua eficácia, avaliação de projeto e à operação da ETE. A partir do diagnóstico operacional do sistema de tratamento, foram propostas e discutidas a viabilidade de modificações e melhorias na estação.

Todos os registros de situações que geraram distúrbios nos processos de tratamento da estação, como quedas de energia foram excluídos do processo. A partir disso, os dados foram tratados no software Microsoft Excel para que pudessem ser observados padrões de comportamento em comparações com a legislação vigente sobre a estação.

A eficiência do tratamento foi estabelecida a partir da avaliação dos resultados de análises laboratoriais das amostras do esgoto, bruto e tratado, do período compreendido entre os anos de 2016 e 2020 e comparações com os padrões de lançamento exigidos pela legislação CONSEMA 355/2017. O período a partir de fevereiro de 2020 foi desconsiderado do estudo em virtude da pandemia da Covid-19, quando observou-se um decréscimo nas vazões de entrada de esgoto na ETE, podendo gerar resultados não representativos para as avaliações. Além disso, alguns parâmetros apresentam período de análise diferente devido ao histórico de análises disponível cedido pela empresa administradora da estação e o parâmetro fósforo foi avaliado por um período maior devido ao seu histórico de altas concentrações.

O fluxograma com as etapas seguidas para realização deste trabalho é apresentado na Figura 6.

Figura 6: Fluxograma do procedimento seguido para realização do trabalho.



Fonte: Autor

### 3.1 Análise de microfauna do lodo ativado

A análise de microfauna do lodo ativado ocorreu a partir da avaliação qualitativa e quantitativa através de microscópio óptico das diferentes espécies de protozoários, distribuição de floco e incidência de bactérias filamentosas encontradas na amostra. O procedimento foi baseado na metodologia do manual CETESB L1.025 e realizado por uma empresa terceirizada. As amostragens foram realizadas em setembro de 2021 a partir de alíquotas de 500 mL retiradas à jusante do reator de lodos ativados.

### 3.2 Análise de eficiência de remoção de fósforo a partir de coagulantes

A avaliação da eficiência de remoção de fósforo foi efetuada em escala de bancada com os coagulantes Sulfato de Alumínio (10%), Cloreto Férrico (3,8%) e Ecofloc PC 300 (10%), utilizando alíquotas de 500 mL de esgoto coletado à montante dos decantadores. Os testes foram realizados em béqueres e realizados em três etapas, sendo elas a coagulação, a floculação e a sedimentação de amostras de efluente tratado.

A coagulação foi realizada a partir de uma alíquota de 500 mL da amostra, onde foi adicionado o coagulante e agitado vigorosamente durante 30 segundos. Finalizada a etapa de coagulação, se inicia a etapa de floculação. Essa etapa consistiu na agitação da amostra durante 30 segundos em velocidade inferior àquela realizada na etapa de coagulação. Após a floculação, a agitação foi interrompida e a amostra descansou durante 1 hora para a sedimentação.

Primeiramente, foi realizado um teste para selecionar um dos três coagulantes. Após foi efetuado um teste com diferentes concentrações do coagulante que apresentou a melhor

eficiência na remoção de fósforo total. As amostras foram analisadas, tanto antes quanto depois do teste para os parâmetros pH, Nitrogênio Amoniacoal e Fósforo total.

Os testes de eficiência de remoção de fósforo por coagulantes foram realizados em setembro de 2021. O dia escolhido para a realização dos testes sucedeu um final de semana de muita chuva no local, o que resultou em um esgoto mais diluído em comparação ao que normalmente é tratado pela estação. Entretanto, como será observado na etapa de Resultados, os testes obtiveram uma alta margem em relação à legislação, o que justifica as quantidades utilizadas.

## 4 Estudo de caso de uma estação de tratamento de esgoto de Porto Alegre

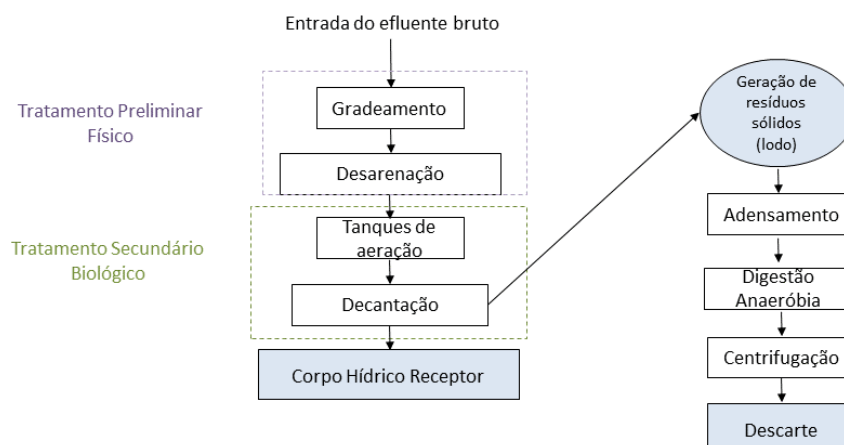
O estudo realizado trata da adequação dos parâmetros fósforo e sólidos sedimentáveis de uma estação de tratamento de esgotos localizada no Rio Grande do Sul. Esta estação atende uma população de cerca de 150 mil habitantes e possui capacidade de tratamento de 444 L/s, ou 38.361,6 m<sup>3</sup>/dia. Foi analisado o processo de tratamento implementado na estação e, posteriormente, analisou-se os parâmetros de monitoramento da qualidade do esgoto que é descartado no corpo hídrico receptor, os quais são enviados à Fepam.

A estação de tratamento de esgoto estudada iniciou sua operação no ano de 1985. À época, seu projeto era tido como fundamental para o plano de despoluição do rio que servia como corpo hídrico receptor do esgoto das comunidades que hoje são abrangidas pela estação.

### 4.1 Processo de Tratamento de Esgoto

O processo de tratamento de esgoto utilizado na ETE contempla os processos de pré-tratamento e tratamento secundário, como pode ser observado na Figura 7.

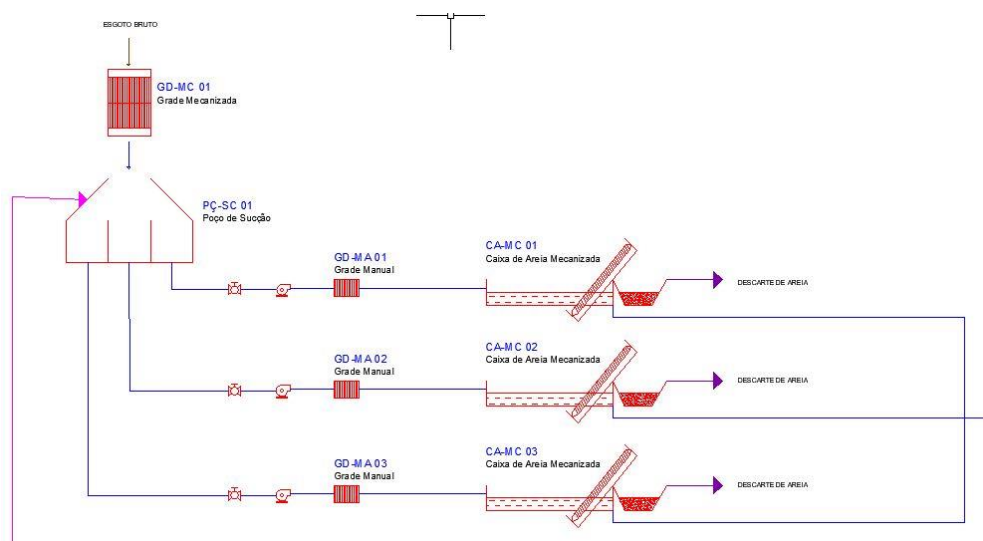
Figura 7: Fluxograma simplificado do processo de tratamento adotado na ETE.



Fonte: Autor

O esgoto bruto chega à estação de tratamento pelas tubulações via bombeamento e é armazenado no poço de acumulação. A primeira etapa, o gradeamento, tem a finalidade de remover os sólidos grosseiros nele contidos, como garrafas, latas, plásticos e afins. Em seguida, o esgoto é encaminhado através de bombas para a segunda etapa de tratamento, onde passará pelo desarenador. As caixas de areia utilizadas no projeto, do tipo retangular com escoamento horizontal, são projetadas para manter o fluxo em uma velocidade próxima a 0,3 m/s, proporcionando assim o tempo necessário para que haja a separação da areia das partículas mais finas em suspensão. Essas etapas que constituem o pré-tratamento podem ser observadas na Figura 8.

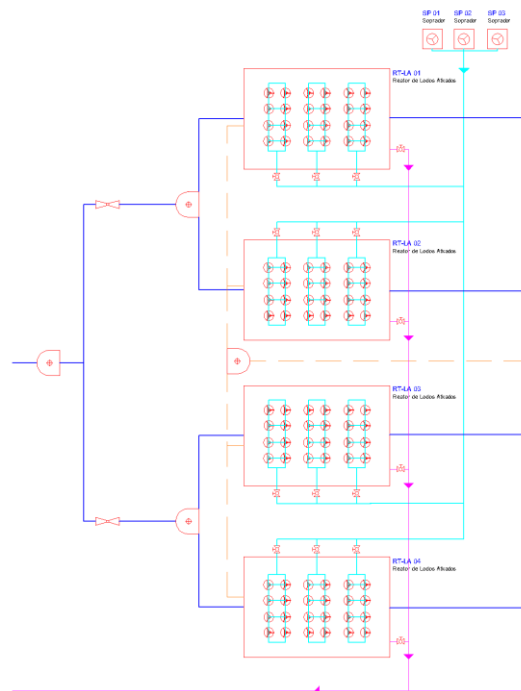
Figura 8: Figura esquemática das operações unitárias constituintes do pré-tratamento da estação de tratamento de esgoto em estudo.



Fonte: Autor

Após o pré-tratamento, o esgoto segue diretamente para a etapa de tratamento secundário constituída por quatro tanques de lodos ativados que operam em paralelo. No projeto original, de 1985, a estação foi projetada para operar em sistema de lodos ativados com aeração convencional, entretanto, ao longo dos anos, a operação da estação implementou a metodologia de lodos ativados com aeração prolongada sem realizar alterações na estrutura da ETE. O ar é insuflado no sistema através de sopradores e difusores de ar localizados ao lado dos reatores e o líquido efluente sai do reator através de vertedouros localizados junto à parede de jusante das unidades. A idade do lodo utilizada é de 28,4 dias. A estrutura dos reatores de lodos ativados pode ser observada na Figura 9.

Figura 9: Figura esquemática dos reatores de lodos ativados com aeração prolongada da estação de tratamento de esgoto em estudo.



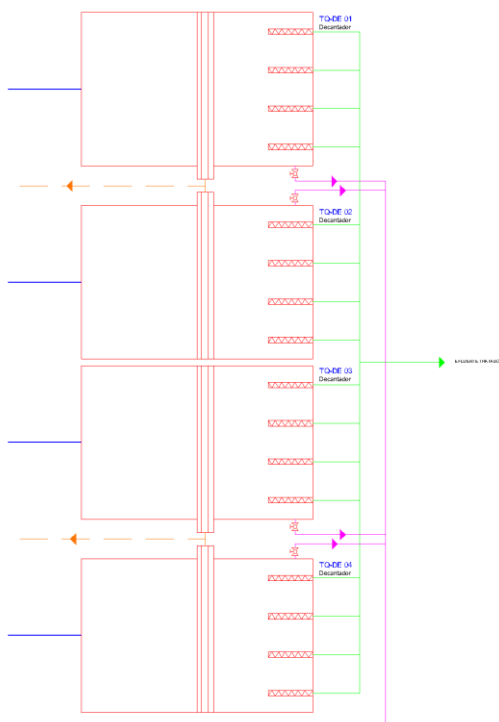
Fonte: Autor

Posteriormente ao tratamento nos reatores de lodos ativados, o esgoto segue para quatro tanques de decantação onde irá ocorrer a sedimentação do lodo. Os decantadores consistem em tanques retangulares com escoamento longitudinal, nos quais o lodo ativado sedimenta no fundo do decantador e é removido por meio de sifão flutuante que se movimenta continuamente em ambos os sentidos ao longo do comprimento do decantador. O lodo é sugado do fundo e descarregado em um canal localizado nas paredes laterais de cada decantador e é encaminhado para uma estação de bombeamento de lodo ativado, que faz o controle da taxa de recirculação de lodo e da quantidade a ser descartada.

O líquido efluente do decantador é removido da sua superfície por meio de calhas fixas que possuem vertedouros retangulares, localizadas à jusante. As calhas são paralelas e dispostas no sentido longitudinal do decantador, desaguando o efluente final. O esquema dos decantadores pode ser observado na Figura 10:



Figura 10: Figura esquemática dos decantadores da estação de tratamento de esgoto em estudo.



Fonte: Autor

A figura esquemática completa apresentando todos os processos do tratamento é apresentada no apêndice A.

Vale ressaltar que não é realizado nenhum tratamento químico em todo o processo da estação, o que pode ser um fator prejudicial à remoção de nutrientes como fósforo e nitrogênio, uma vez que somente o tratamento biológico pode não ter a eficiência necessária para tal tratamento.

#### 4.2 Parâmetros de Qualidade do Tratamento do Esgoto

Para avaliar a eficiência do tratamento e a qualidade do esgoto tratado destinado ao corpo hídrico receptor são realizadas análises mensais dos principais parâmetros do esgoto. A escolha desses parâmetros se deu pela própria empresa administradora da estação de tratamento de acordo com as características apresentadas pelo esgoto bruto, também levando em consideração as exigências do órgão ambiental que constam na licença de operação do empreendimento.

Os parâmetros eleitos para o monitoramento da estação foram DBO, DQO, Nitrogênio, Fósforo, Sólidos Suspensos Totais, óleos e graxas, pH, sólidos dissolvidos, surfactantes, coliformes totais e *E. coli*. Além desses parâmetros, também são monitorados o oxigênio dissolvido e os metais, porém estas análises são realizadas em uma frequência menor, sendo apenas trimestralmente. Uma avaliação mais completa dos parâmetros de qualidade será feita no tópico dos resultados, onde serão analisados os principais parâmetros e será feita uma comparação com a legislação ambiental vigente.

## 5 Resultados

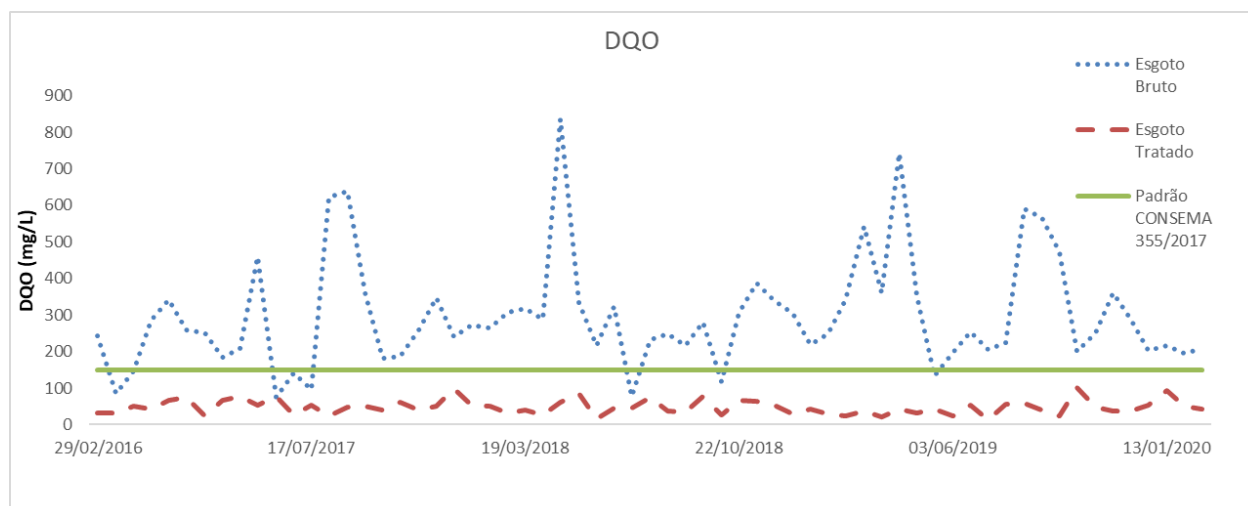
### 5.1 Avaliação do histórico dos parâmetros do efluente

A fim de avaliar a eficiência do tratamento realizado na estação, foram analisados os dados históricos das análises dos parâmetros eleitos como indicadores da qualidade do processo.

#### a) DQO

Conforme a resolução CONAMA 355/2017, o limite de lançamento para o parâmetro DQO é de 150 mg/L. Os valores de DQO entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020 foram plotados na Figura 11 em comparação com o valor exigido pela legislação.

Figura 11: Resultado das análises de DQO do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020.



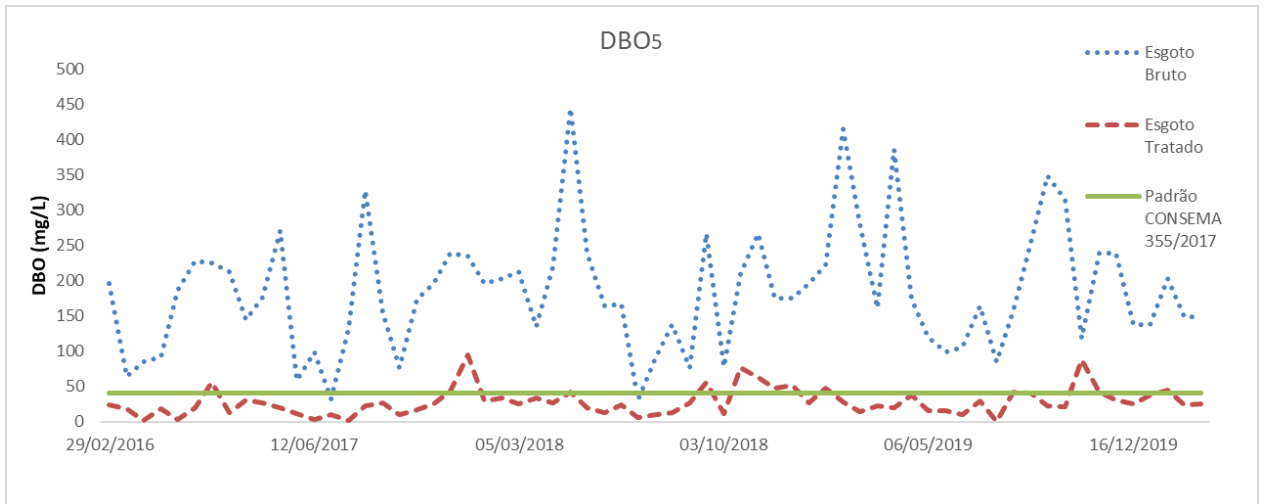
Fonte: Autor

Como observado na Figura 11, o efluente tratado esteve sempre em conformidade com o valor máximo de lançamento exigido em legislação no período analisado, demonstrando eficiência do sistema de tratamento para esse parâmetro.

#### b) DBO<sub>5</sub>

Conforme a resolução CONAMA 355/2017, o limite de lançamento para o parâmetro DBO<sub>5</sub> é de 40 mg/L. Os valores das análises entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020 foram plotados na Figura 12 em comparação com o valor exigido pela legislação.

Figura 12: Resultado das análises de DBO<sub>5</sub> do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020.



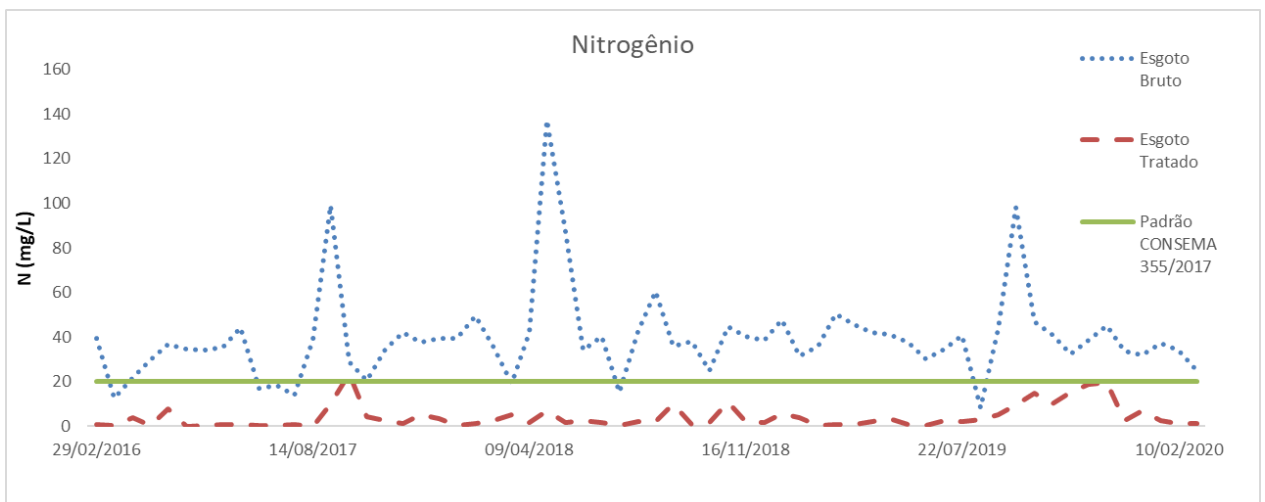
Fonte: Autor.

Analisando a Figura 12, pode-se observar que o parâmetro DBO5 excede o limite exigido pela legislação em algumas análises, representando um total de 23% das amostras testadas. O resultado não esteve de acordo com o esperado, pois como os únicos processos de tratamento empregados na estação são o pré-tratamento e o tratamento biológico, a carga orgânica biodegradável deveria apresentar melhores resultados. Vale também ressaltar que os picos de DBO no esgoto tratado não estão diretamente relacionados com os picos de concentração deste parâmetro no esgoto bruto.

### c) Nitrogênio

Conforme a resolução CONAMA 355/2017, o limite de lançamento para o parâmetro Nitrogênio é de 20 mg/L. Os valores das análises entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020 foram plotados na Figura 13 em comparação com o valor exigido pela legislação.

Figura 13: Resultado das análises de Nitrogênio do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020.



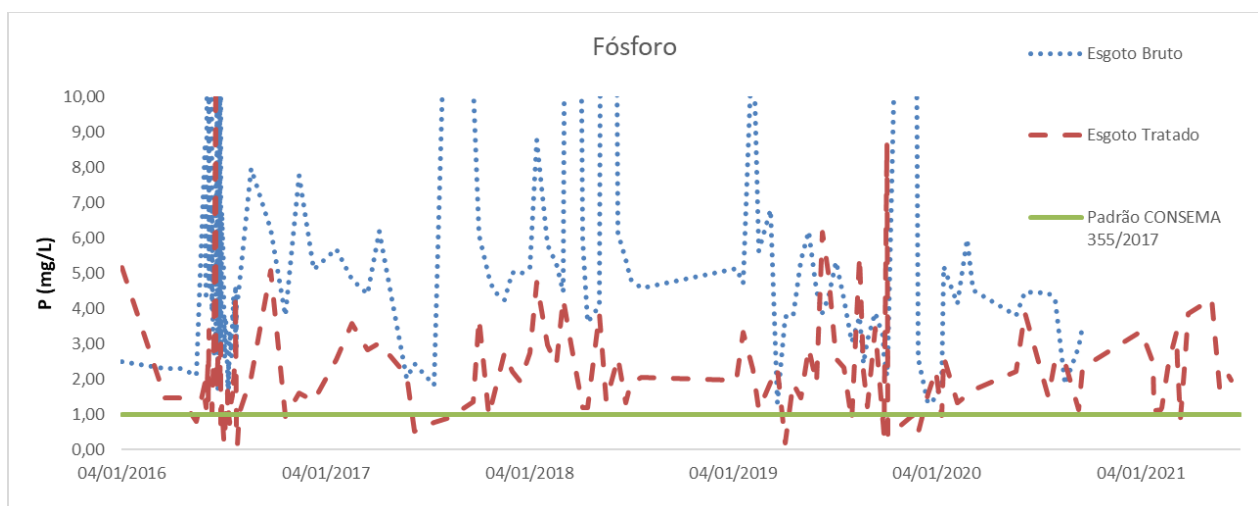
Fonte: Autor

Os valores de nitrogênio obtidos para o esgoto tratado ficaram entre 0,11 e 23,86 mg/L, atendendo ao valor exigido pela legislação em 98% dos casos. Como apenas 2% das análises ficaram acima do valor máximo, esse resultado pode ser considerado normal.

#### d) Fósforo

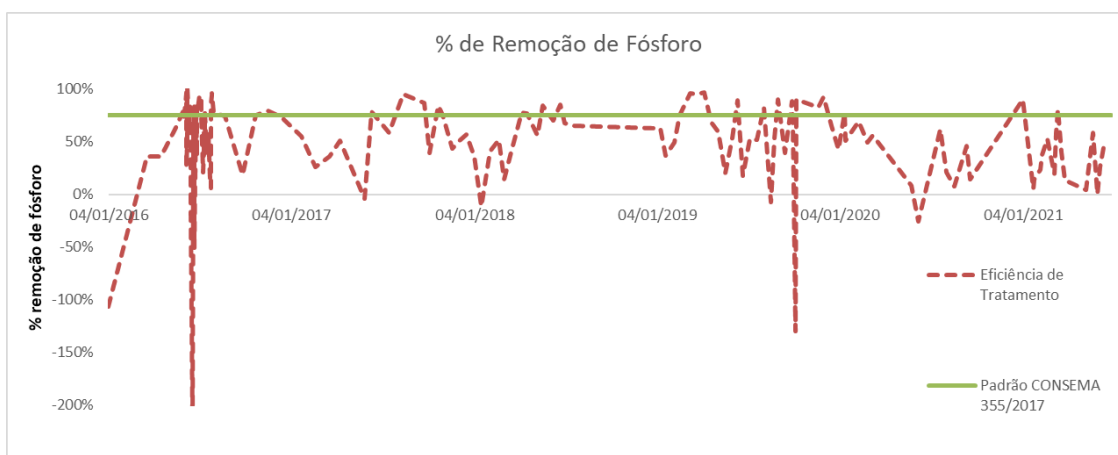
Conforme a resolução CONAMA 355/2017, o limite de lançamento para o Fósforo é de 1 mg/L ou 75% de eficiência no tratamento. Os valores das análises entre janeiro de 2016 e junho de 2021 foram plotados na Figura 14 em comparação com o valor bruto exigido pela legislação e na Figura 15 em comparação com o percentual de remoção.

Figura 14: Resultado das análises de Fósforo do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre janeiro de 2016 e junho de 2021.



Fonte: Autor

Figura 15: Resultado das análises em relação à eficiência de remoção de Fósforo no tratamento estudado em comparação com a eficiência exigida pela resolução CONSEMA 355/2017, no período entre janeiro de 2016 e junho de 2021.



Fonte: Autor

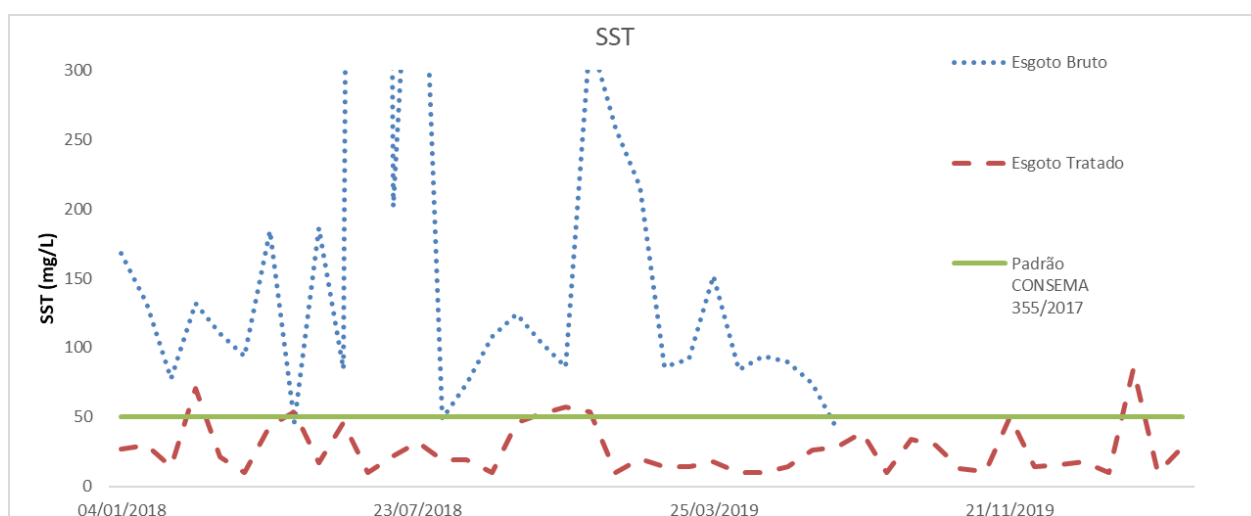
Como podemos observar na Figura 15, o fósforo não foi suficientemente removido durante o período de análise. A eficiência média de tratamento é de 58%, abaixo do exigido pela legislação, assim como o valor médio apresentado pelo parâmetro no esgoto tratado, que é de 2,12 mg/L. Além disso, o esgoto tratado apresenta casos de eficiência negativa de tratamento, ou seja, o parâmetro fósforo apresentou maior valor no efluente tratado do que no efluente bruto.

As análises indicam para a necessidade de grande melhoria no tratamento, uma vez que o fósforo, quando lançado em corpos hídricos, provoca o enriquecimento do meio e possibilita o crescimento intenso de microrganismos, fenômeno caracterizado como eutrofização.

#### e) Sólidos Suspensos Totais (SST)

Conforme a resolução CONAMA 355/2017, o limite de lançamento para o parâmetro SST é de 50 mg/L. Os valores das análises entre janeiro de 2018 e fevereiro de 2020 foram plotados na Figura 14 em comparação com o valor exigido pela legislação.

Figura 16: Resultado das análises de SST do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre janeiro de 2018 e fevereiro de 2020.



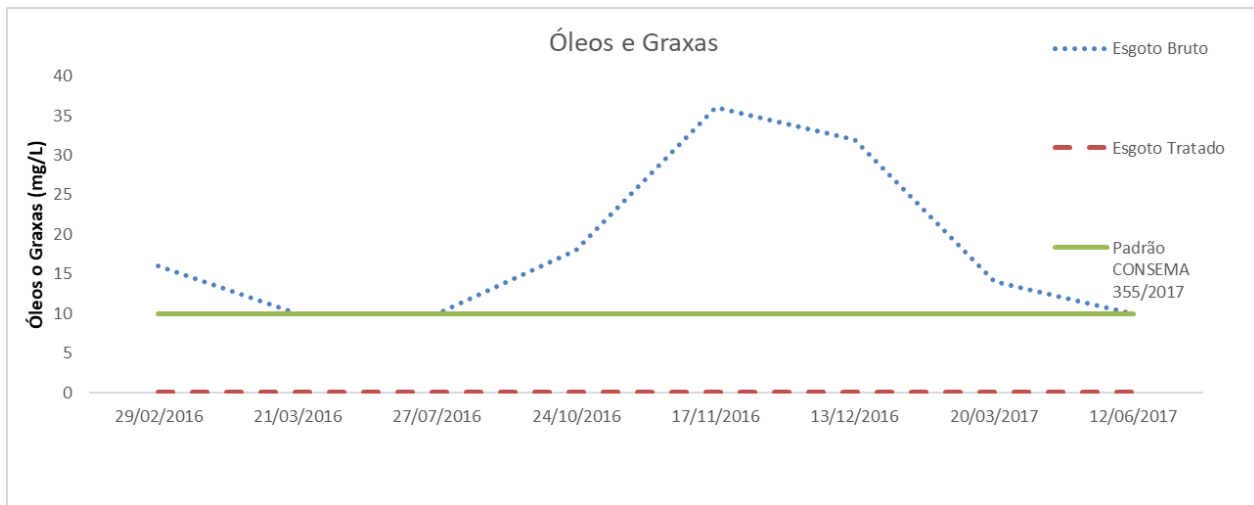
Fonte: Autor

O parâmetro SST apresentou bons resultados, sendo suficientemente removido em 87% das análises. Apesar de as análises estarem em conformidade na grande maioria dos casos, as 13% que não atingiram o valor exigido pela legislação são um percentual considerável e não podem ser desprezadas. Essas inconformidades podem estar relacionadas à problemas de decantação, uma vez que, em visitas técnicas realizadas no local, foram observados flocos de lodo não sedimentado saindo pelo canal à jusante ao decantador.

#### f) Óleos e Graxas

Conforme a resolução CONAMA 355/2017, o limite de lançamento para o parâmetro Óleos e Graxas é de 10 mg/L. Os valores das análises entre fevereiro de 2016 e junho de 2017 foram plotados na Figura 17 em comparação com o valor exigido pela legislação.

Figura 17: Resultado das análises de Óleos e Graxas do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e junho de 2017.



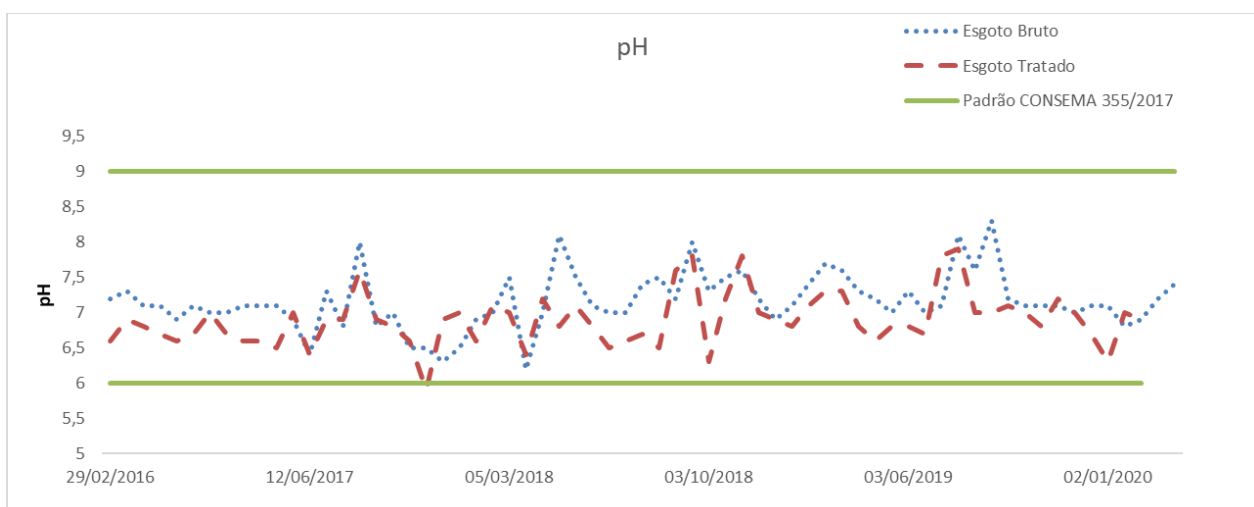
Fonte: Autor

Analisando a Figura 17, o parâmetro Óleos e Graxas foi suficientemente removido durante o período de análise, estando sempre em conformidade com o valor exigido pela legislação e apresentando eficiência de tratamento próxima de 100%.

#### g) pH

Conforme a resolução CONAMA 355/2017, a faixa de lançamento para o parâmetro pH é entre 6,0 e 9,0. Os valores das análises entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020 foram plotados na Figura 18 em comparação com o valor exigido pela legislação.

Figura 18: Resultado das análises de pH do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020.



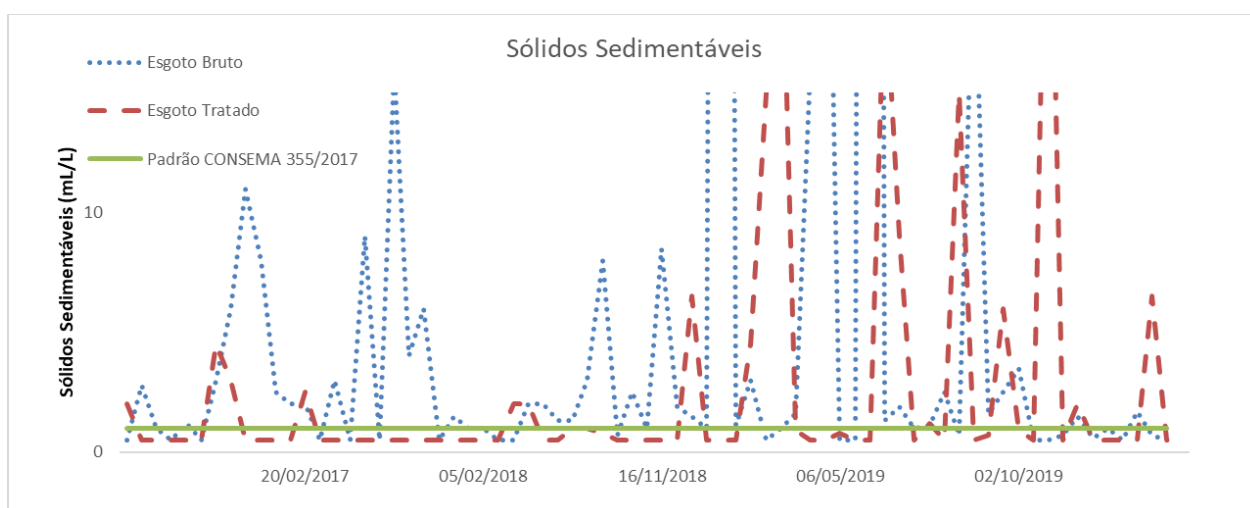
Fonte: Autor

Conforme observado na Figura 18, o pH do esgoto tratado variou entre 8,3 e 5,9, sendo o menor valor ligeiramente inferior ao limite estabelecido pela legislação. O parâmetro esteve em conformidade em 98% das análises, portanto pode ser considerado como apresentando boa eficiência de tratamento.

#### h) Sólidos Sedimentáveis

Conforme a resolução CONAMA 355/2017, o limite de lançamento para o parâmetro Sólidos Sedimentáveis é de 1,0 mL/L. Os valores das análises entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020 foram plotados na Figura 19 em comparação com o valor exigido pela legislação.

Figura 19: Resultado das análises de Sólidos Sedimentáveis do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro 2020.



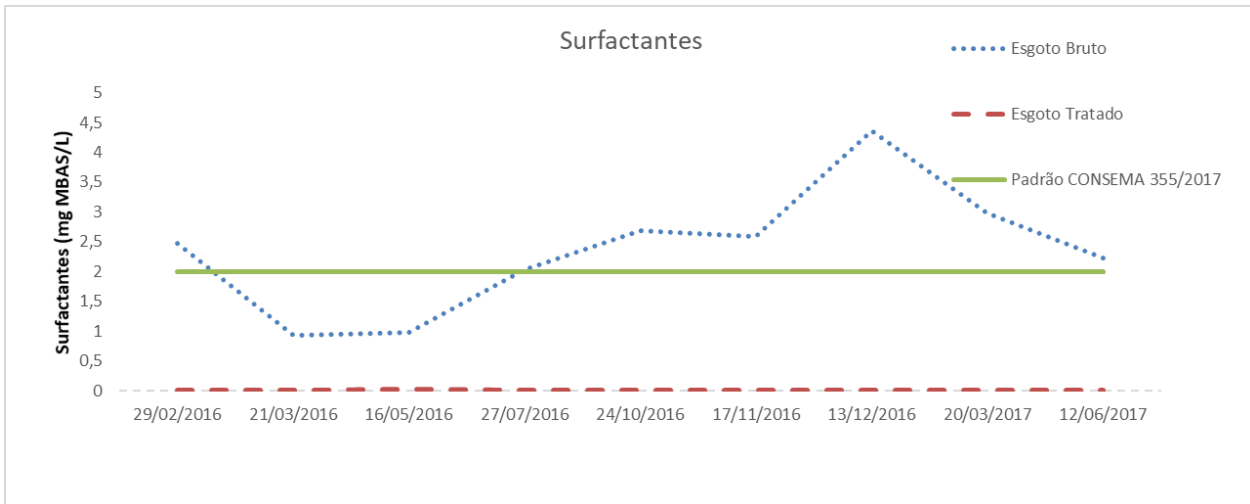
Fonte: Autor

Como pode-se observar na Figura 19, o parâmetro Sólidos Sedimentáveis apresentou variações bruscas de concentração durante o período analisado, principalmente no período a partir de dezembro de 2018, onde chegou a apresentar o valor de 30 mL/L, 30 vezes acima do limite permitido pela legislação. Esse excesso pode ter sido causado por problemas na sedimentação dos lodos ativados no decantador, processo que será investigado no item 5.2.

#### i) Surfactantes

Conforme a resolução CONAMA 355/2017, o limite de lançamento para o parâmetro Surfactantes é de 2,0 mg/L. Os valores das análises entre fevereiro de 2016 e junho de 2017 foram plotados na Figura 20 em comparação com o valor exigido pela legislação.

Figura 20: Resultado das análises de Surfactantes do esgoto tratado e esgoto bruto em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e junho de 2017.



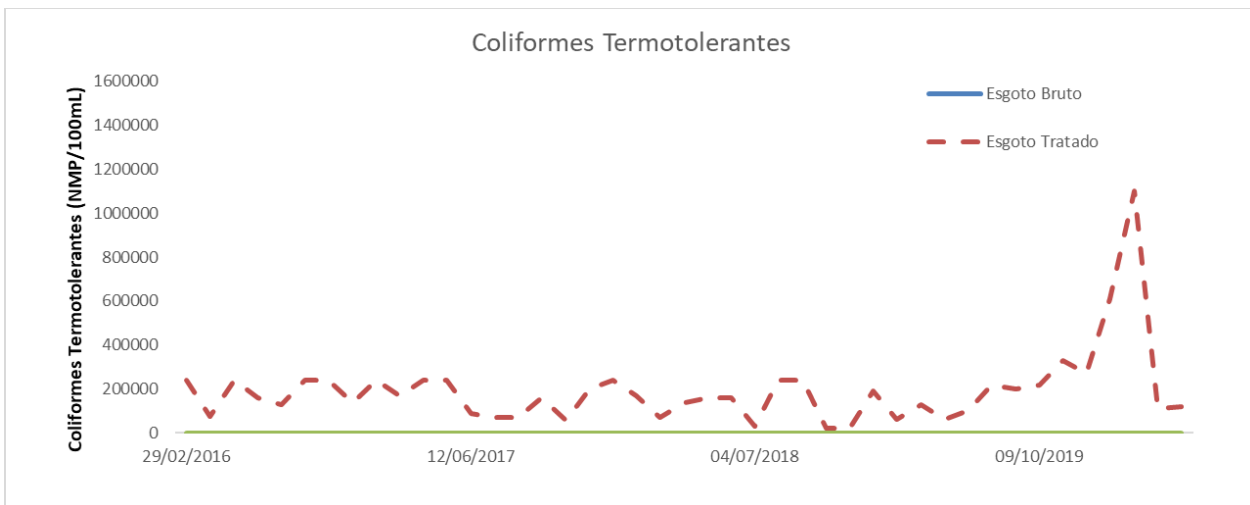
Fonte: Autor

Analisando a Figura 20, pode-se observar que o parâmetro Surfactantes foi suficientemente removido em 100% das análises realizadas, ficando sempre bem abaixo do limite exigido pela legislação e apresentando eficiência de tratamento próxima de 100%.

j) Coliformes Termotolerantes

Conforme a resolução CONAMA 355/2017, o limite de lançamento para o parâmetro Coliformes Termotolerantes é de 1000 NMP/100mL ou 95% de eficiência. Os valores das análises entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020 para o esgoto tratado foram plotados na Figura 21 em comparação com o valor exigido pela legislação e na Figura 22 em comparação com o percentual de remoção.

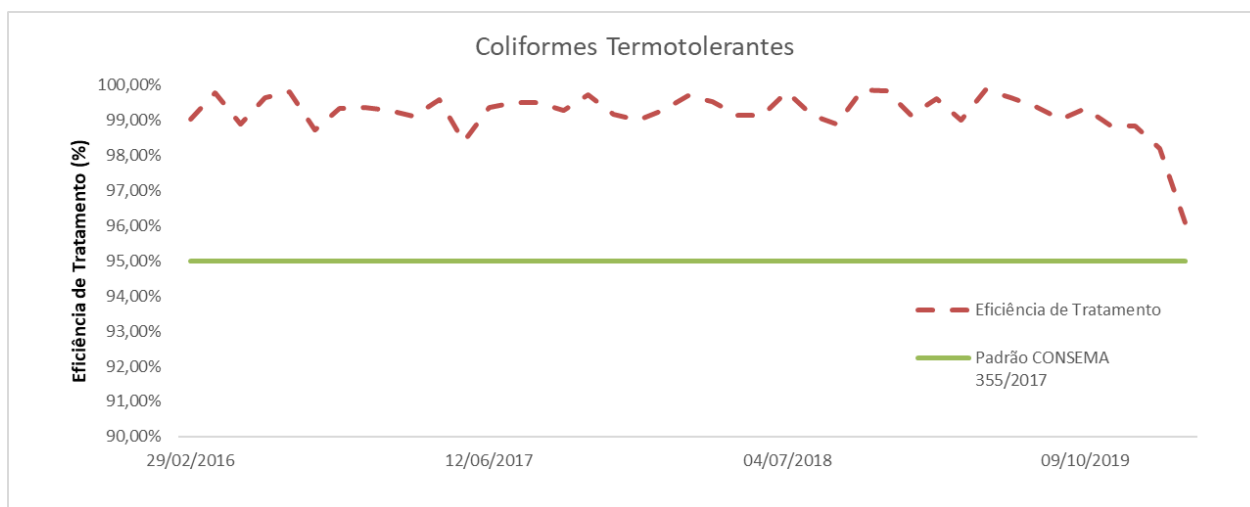
Figura 21: Resultado das análises de Coliformes Termotolerantes do esgoto tratado em comparação com a resolução CONSEMA 355/2017 no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020.



Fonte: Autor



Figura 22: Resultado das análises de remoção de Coliformes Termotolerantes no tratamento em comparação com a eficiência exigida pela resolução CONSEMA 355/2017, no período entre fevereiro de 2016 e fevereiro de 2020.



Fonte: Autor

O parâmetro Coliformes Termotolerantes no efluente tratado apresenta um valor total acima do valor exigido pela legislação, como podemos observar na Figura 21. Entretanto, na Figura 22 pode-se observar que quando comparado com a eficiência mínima de tratamento, o parâmetro se enquadra em todas as análises realizadas.

## 5.2 Avaliação de Microfauna do Lodo Ativado

A análise da microfauna do lodo ativado nos mostra que existe uma microfauna bastante diversificada e numerosa no lodo utilizado para tratamento no reator de lodos ativados, com destaque para a presença de protozoários livres natantes, ciliados fixos, rizópodes, micrometazoários e algas. Além destes, também há a presença de bactérias filamentosas, as quais formam uma trama de filamentos longos e dispersos que ocupam o interior dos flocos e parte dos espaços entre eles, tendo muita importância para a estrutura do floco. A identificação da microfauna observada, de acordo com o Relatório Técnico Senai LB 4130/21, está apresentada na Tabela 3, e Figura 23a) e Figura 23b).

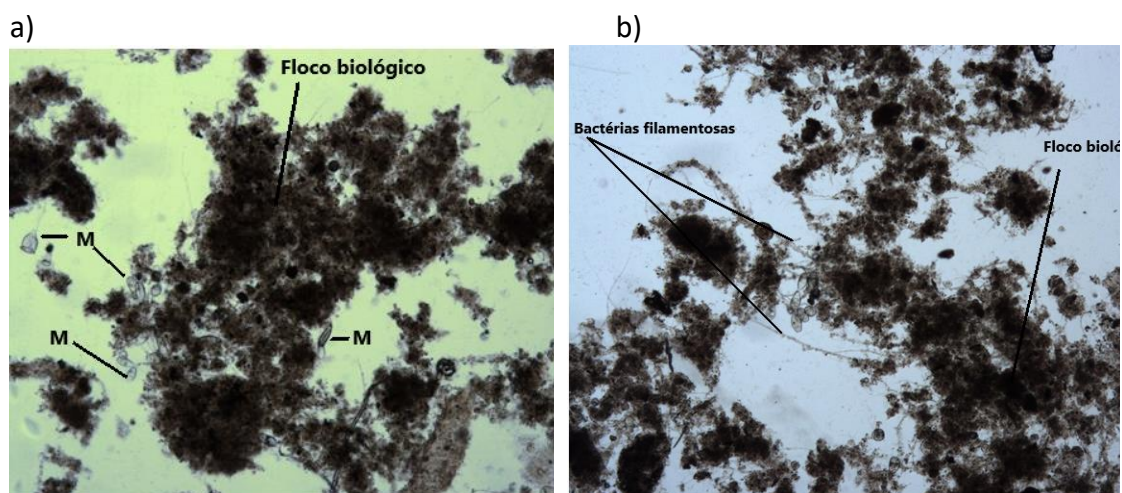
**Tabela 3:** Identificação da microfauna observada no lodo ativado utilizado no tratamento.

Grupo	Classificação	Espécie	Nº de indivíduos/mL
		<i>Chilodonella sp</i>	7
		<i>Didinium sp</i>	2
Protozoários	Ciliados Livres Natantes	<i>Chaenia sp</i>	4
		<i>Tetraymena sp</i>	2
		<i>Spathidium sp</i>	2

		<i>Litonotus sp</i>	4
		<i>Colpoda sp</i>	>50
		<i>Euplotes sp</i>	10
		<i>Aspidisca sp</i>	4
	Ciliados Fixos	<i>Opercularia sp</i>	15
		<i>Vorticella sp</i>	>50
	Rizópode com Carapaça	<i>Arcella sp</i>	>50
		<i>Philodina sp</i>	2
Micrometazoário	Rotífero	<i>Trichocerca sp</i>	15
Alga	Chlorophyceae	<i>Chiorella sp</i>	2

Fonte: Relatório Técnico Senai LB 4130/21.

Figura 23: a) Floco biológico e bactérias filamentosas no lodo biológico e b) Diversidade de microrganismos (M) e floco biológico do lodo.

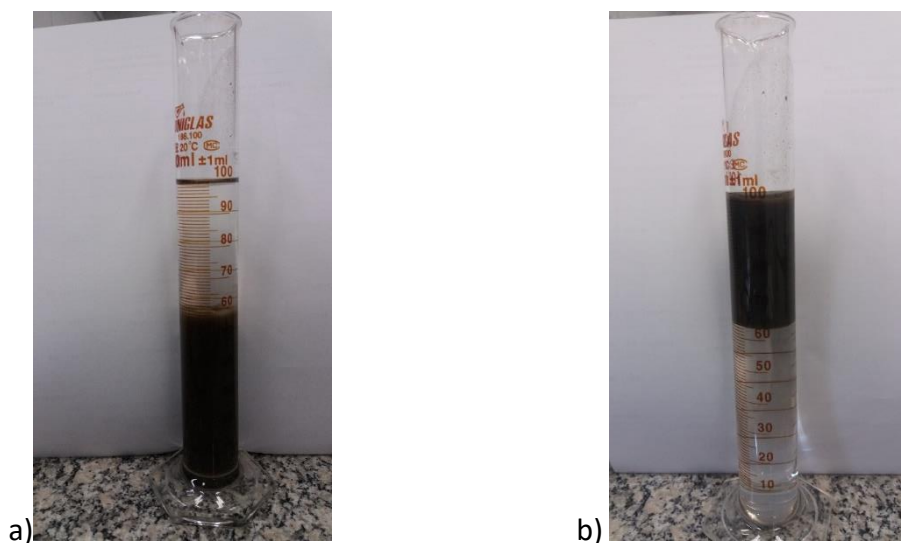


Fonte: Relatório Técnico Senai LB 4130/21.

A elevada concentração de ciliados livres da espécie *Colpoda sp*, ciliados fixos *Vorticella sp* e Rizópodes *Arcella sp.*, conforme observado na Tabela 3, pode ser um indicativo de um sistema com baixo tempo de detenção e choque de carga, de acordo com o Relatório Técnico Senai LB 4130/21. Também se considera que a presença de rotíferos é um indicativo de sistemas que operam com elevada variação de carga e idade de lodo avançada, conforme indicado pelo laudo técnico do Senai LB 4130/21.

Também se destaca a presença de bactérias filamentosas formando um floco biológico consistente, mas que apresenta uma elevada concentração de bactérias entre os flocos, como observado na Figura 23. Segundo (Bento et al., 2005), esta condição pode evidenciar um desequilíbrio das relações entre as bactérias formadoras do sistema de lodos ativados e a diversidade de protozoários. Esse fato pode levar ao intumescimento do lodo, interferindo em sua sedimentação e compactação, como é observado na Figura 24a) e Figura 24b)

Figura 24: a) Amostra de lodo ativado após uma hora de decantação e b) após 3 horas de decantação.



Apesar do alto número de bactérias filamentosas por floco e da conseqüente flotação do lodo, como observado na Figura 24b), a amostra apresenta uma adequada diversidade de espécies, principalmente de protozoários do grupo “ciliados livres natantes”. Esses grupos de microrganismos são responsáveis pelo processo de tratamento em reatores de lodos ativados e é um indicativo de boas condições de depuração e estabilidade do sistema (Figueiredo e Domingues, 1997). O sistema também apresentou oxigênio dissolvido de 4,84 mg/L, valor considerado adequado para o tratamento. Entretanto, a predominância de um grupo específico de microrganismos pode ser acompanhada pelo declínio de outra população em função de características de seletividade impostas pelo meio, como baixo tempo de detenção, choque de carga e deficiência na oxigenação.

### 5.3 Avaliação da eficiência de tratamento quanto a remoção de fósforo

Para o tratamento do fósforo, foram estudadas possibilidades que apresentassem compatibilidade técnica com a estação de tratamento de efluentes, visando o mínimo de alteração em seu layout e o máximo de eficiência. Por conta disso, foi selecionado o método de precipitação química e foram avaliados os compostos cloreto férrico, sulfato de alumínio e Ecofloc PC 300 e sua ação como coagulante. Inicialmente, o esgoto possuía as características apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4:** Parâmetros apresentados pelo esgoto durante o processo de testagem dos coagulantes.

Parâmetro	Esgoto bruto	Esgoto após o tratamento de lodo ativado	Esgoto antes da coagulação
pH	6,9	6,2	6,2
Fósforo total (mg/L)	2,1	1,3	1,8
Nitrogênio amoniacal	22,58	1,16	1,47

Inicialmente, via Jar Test, foi verificado o melhor coagulante para o tratamento de fósforo do esgoto. Foram testados os coagulantes Sulfato de alumínio à concentração de 10%, cloreto férrico à 3,8% e Ecofloc PC 300 à 10%. Os testes foram realizados em amostras de efluente tratado com alíquotas de 500 mL. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5:** Concentrações de fósforo obtidas após teste de coagulação com os coagulantes sulfato de alumínio, cloreto férrico e Ecofloc PC 300 nas respectivas concentrações.

Alíquotas	Coagulante (%)	Volume utilizado (mL)	Concentração de Fósforo (mg/L)
1	Sulfato de alumínio (10%)	1	0,9
2	Cloreto férrico (3,8%)	0,5	0,2
3	Ecofloc PC 300 (10%)	1	1,7

De acordo com os testes apresentados na Tabela 5, pode ser concluído que o cloreto férrico promoveu uma maior remoção de fósforo do esgoto, apresentando o melhor desempenho perante os coagulantes testados. A partir disso, foram realizados os testes de concentração do coagulante, a fim de determinar a concentração ótima para tratamento. Os testes foram realizados em amostras de efluente após a saída do tratamento em reator de lodos ativados com alíquotas de 500 mL. Os resultados dos testes estão apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6:** Resultados dos testes de determinação do volume ótimo de cloreto férrico 3,8% para tratamento de fósforo.

Alíquotas	Volume utilizado (mL)	Concentração final de fósforo (mg/L)	pH final
1	0,5	0,1	5,9

2	0,25	0,3	6,1
3	0,15	0,8	6,2
4	0,05	1,4	6,4

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 6, podemos concluir que o cloreto férrico é um bom coagulante para tratamento do esgoto, apresentando ótima eficiência no tratamento do fósforo, sendo a quantidade mais efetiva de 1 mL/L de cloreto férrico 3,8%, resultado apresentado pela alíquota 1. Como o cloreto férrico é encontrado comercialmente na concentração de 38%, também pode ser feita a adição de 0,1mL/L de cloreto férrico nesta concentração.

Em estudos realizados por Caravelli et al. (2012) em escala laboratorial utilizando o cloreto férrico como coagulante foram obtidos resultados bastante satisfatórios, onde a concentração de ortofosfato residual variou entre 0,25 e 1 mg/L, a concentração total de fósforo ficou abaixo de 2 mg/L em todas as amostras e a eficiência média de remoção foi de 97%, fatores que estão de acordo com o exigido pela legislação ambiental vigente para o parâmetro fósforo. Para a obtenção destes resultados, o estudo teve como condições operacionais o tempo de retenção hidráulica de 63 horas, idade do lodo de 21 dias, temperatura entre 17 e 21°C e OD entre 2 e 4 mg/L.

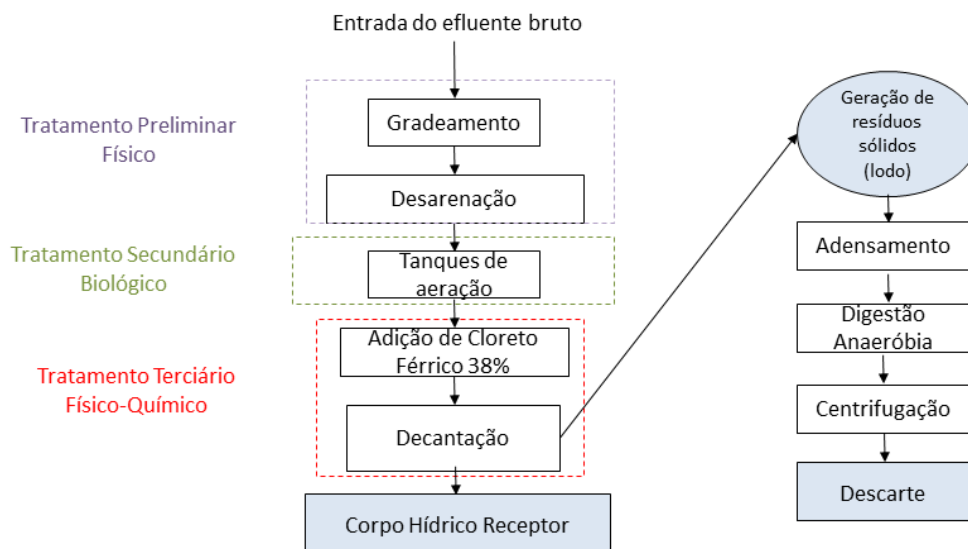
Garss (2019) também estudou e realizou testes de coagulantes para remoção de fósforo em estações de tratamento de esgoto. Ele utilizou os coagulantes cloreto férrico (20, 30, 40, 50 e 60 mg/L), sulfato de alumínio (30, 40 e 50 mg/L) e policloreto de alumínio (PAC) (60, 70 e 80 mg/L). Em seus resultados, o coagulante que apresentou a maior eficiência foi o cloreto férrico na concentração de 50 mg/L, apresentando concentração de fósforo no esgoto tratado de 0,175 mg/L. Garss também abordou a concentração de ferro após o tratamento com o cloreto férrico e o comparou com a legislação. A concentração máxima de ferro obtida foi de 0,517 mg/L, abaixo do limite estabelecido de 10 mg/L pela legislação CONSEMA 355/2017.

#### 5.4 Proposta de melhoria

Conforme observado no item 5.1, nota-se que os principais problemas enfrentados pela estação de tratamento de esgotos são relacionados ao não atendimento do valor exigido em legislação para os parâmetros fósforo e sólidos sedimentáveis. Além disso, com base nos resultados obtidos no item 5.3, pode-se concluir que a adição do tratamento químico por coagulação ao sistema traria benefícios frente ao processo já realizado.

Com base nos resultados obtidos nos estudos detalhados no capítulo 5.3, que apresenta uma avaliação de alguns coagulantes disponíveis no mercado, é proposto o processo apresentado na Figura 25 para o tratamento de esgoto da estação em estudo.

Figura 25: Processo de tratamento de esgotos proposto para a ETE em estudo.



Fonte: Autor

A alteração proposta consiste na adição de cloreto férrico 38% na tubulação entre o reator de lodos ativados e o decantador secundário. Segundo Metcalf (2016), a adição do coagulante no decantador secundário também causa uma melhoria no processo de sedimentação do lodo, o que pode sanar conjuntamente os problemas com o fósforo e os sólidos sedimentáveis.

A adição de cloreto férrico como coagulante causa um aumento significativo na produção de lodo devido ao acentuado aumento de sólidos suspensos fixos no esgoto em tratamento. Esse aumento na fração inorgânica do lodo é causado pela incorporação de Fe (III) e ferro-hidroxi-fosfato nos flocos microbianos advindos do processo de lodos ativados. É sabido que que essa situação aumenta a densidade dos flocos, aprimorando a sedimentação do lodo. Além disso, também pode ser gerado como efeito colateral a diminuição do tamanho dos flocos. Isso acontece devido ao aumento de sólidos suspensos fixos no esgoto em tratamento, o que reduz a proporção de filamentos disponíveis para a formação de agregados, pois estes são reprimidos pelo ferro (Caravelli et al., 2012).

Ainda levando em consideração os resultados obtidos no capítulo 5.4, pode-se observar que o tratamento por cloreto férrico causa uma diminuição no pH do esgoto por conta de seu caráter ácido. Em caso de não atendimento do parâmetro pH ou de problemas eventuais na microfauna biológica causado pelo retorno de lodo, pode-se adicionar ao sistema uma solução de hidróxido de sódio 5%, a fim de realizar o ajuste do pH do meio.

## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

Neste trabalho realizou-se uma análise dos parâmetros de monitoramento de uma estação de tratamento de esgoto da cidade de Porto Alegre/RS a fim de avaliar o seu desempenho. Pode-se concluir que a ETE não apresenta resultados satisfatórios para a totalidade dos parâmetros, principalmente o Fósforo e os Sólidos Sedimentáveis, sendo passível de melhorias no processo de tratamento.

Avaliando-se o histórico dos parâmetros de qualidade do esgoto, pôde-se observar que o tratamento atingiu a eficiência necessária na maioria das análises para os parâmetros DBO<sub>5</sub>, DQO, Nitrogênio, Óleos e Graxas, pH, Surfactantes e Coliformes Termotolerantes. Entretanto, para os parâmetros Fósforo e Sólidos Sedimentáveis os valores obtidos ficaram fora do exigido pela Resolução CONSEMA 355/2017 em um grande percentual das análises. Também foi avaliada a microfauna biológica do lodo ativado, a qual apresentou diversidade de espécies, sinal de boa depuração e eficiência do sistema, apesar do excesso de bactérias filamentosas presentes no floco, o que pode dar origem aos problemas de flotação do lodo. A partir deste diagnóstico, investigou-se a possível causa para o não atendimento dos padrões.

Quanto à análise da estrutura física da ETE, foi concluído que o problema da estação de tratamento encontra-se na falta de um tratamento físico-químico após o tratamento por lodos ativados, pois somente esse não seria suficiente para atingir os parâmetros exigidos em legislação. Com a análise de microfauna biológica, pode-se concluir que não há problema no tratamento biológico no que se refere à remoção de nutrientes, mas sim quanto à sedimentação do lodo pela quantidade de bactérias filamentosas presentes no floco biológico.

A análise dos coagulantes estudados permitiu concluir que o cloreto férrico apresentou os melhores resultados para remoção de fósforo do sistema. A concentração que apresentou a melhor eficiência de tratamento foi a de 3,8%, com 1 mL de solução para 1 litro de esgoto. Como o cloreto férrico é mais facilmente encontrado comercialmente na concentração de 38%, pode ser adicionado 0,1mL de solução para cada litro de esgoto a ser tratado.

A partir das conclusões obtidas no estudo de caso, propôs-se como melhoria para o tratamento do esgoto na estação a implementação de cloreto férrico 38% entre o tratamento biológico e o decantador. Essa mudança auxiliaria ao mesmo tempo na remoção do nutriente fósforo e na sedimentabilidade do lodo, fazendo com que o tratamento possa atingir os valores exigidos na legislação também para os parâmetros Fósforo e Sólidos Sedimentáveis.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a realização de uma análise de viabilidade técnica e econômica da implementação da melhoria proposta, assim como um monitoramento da estação após tal implementação e dos efeitos da adição de cloreto férrico sobre o sistema.

## REFERÊNCIAS

ANA. **Portal da Qualidade das Águas**. Disponível em: <[http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx#\\_ftn3](http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx#_ftn3)>. Acesso em: 27 out. 2021.

ANA. **Atlas esgotos: atualização da base de dados de estações de tratamento de esgotos no Brasil**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <[https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/encarteatlasesgotos\\_etes.pdf/view](https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/encarteatlasesgotos_etes.pdf/view)>. Acesso em: 25 jul. 2021.

ANA, A. N. DE Á. **A questão da água no Nordeste**. Brasília: [s.n.].

APHA, A. P. H. A.; AWWA, A. W. W. A. ;; WEF, W. E. F. **Standard Methods for examination of water and wastewater**. Washington, DC: APHA/AWWA/WEF, 2012

BENTO, A. P.; SEZERINO, P. H.; PHILIPPI, L. S. Caracterização da microfauna em estação de tratamento de esgotos do tipo lodos ativados: um instrumento de avaliação e controle do processo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 10, n. 2005.

BRASIL. **Resolução CONSEMA nº 355, de 19 de julho de 2017. Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul**. Diário Oficial do Estado, 2017.

BRASIL, M. DAS C.; AMBIENTAL, S. N. DE S. **Processos de tratamento de esgotos Guia do profissional em treinamento**. Brasília: [s.n.]. . Acesso em: 18 out. 2021.

BRASIL; SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO - SNS; MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 25º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**. Brasília: [s.n.]. . Acesso em: 22 jul. 2021.

BRASIL; SECRETARIA NACIONAL DE SANEAMENTO - SNS; MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: 22º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**. Brasília: [s.n.].

CAMPOS, J. R.; VAN HAANDEL, A. C.; FILHO, B. C. Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo. **Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB)**, 1999.

CARAVELLI, A. H.; DE GREGORIO, C.; ZARITZKY, N. E. Effect of operating conditions on the chemical phosphorus removal using ferric chloride by evaluating orthophosphate precipitation and sedimentation of formed precipitates in batch and continuous systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 209, p. 469–477. 2012.

CHERNICHARO, C. A. DE L.; RIBEIRO, T. B.; GARCIA, G. B. Panorama do tratamento de esgoto sanitário nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil: tecnologias mais empregadas. **Revista DAE**, v. 66, n. 213, p. 5–19, 2018.



CHIAVELLI, H. G. R.; TORRECILHAS, A. R.; SELLA, M. Etapas de um sistema de tratamento de efluente e processos convencionais de tratamento: uma revisão de literatura. Stages of an effluent treatment system and conventional treatment processes: a review. **IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**. 2019.

COLLIVER, B. B.; STEPHENSON, T. Production of nitrogen oxide and dinitrogen oxide by autotrophic nitrifiers. **Biotechnology Advances**, v. 18, n. 2000.

COPASA. **Processos de Tratamento**. Disponível em: <<https://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/esgotamento-sanitario/processos-de-tratamento>>. Acesso em: 30 ago. 2021.

CPHEEO, G. **Manual on sewerage and sewage treatment systems**New DelhiMinistry of Urban Development, 2013.

DALTIN, D. **Tensoativos: química, propriedades e aplicações**. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2011.

DAVIS, M. **Tratamento de águas para abastecimento e residuárias: princípios e práticas**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

DE, L.; FELIPE, O.; DE, S. **Surfactantes sintéticos e biossurfactantes**. Química e Sociedade. v. 39, p. 228–236, 2017.

DE OLIVEIRA, A. J.; SANTOS, M. C. H. G.; MASSUMI ITAYA, N. Coliformes Termotolerantes: bioindicadores da qualidade da água destinada ao consumo humano. **Atras da Saúde Ambiental - ASA**, v. 3, p. 24–29, 2015.

EPA, U. S. E. P. A. **Phosphorus Removal Design Manual**. Washington, DC: Cincinatti: EPA, 1987

ESTEVES, F. DE A. **Fundamentos de limnologia**. [s.l.] Editora Interciência, 1988.

FIGUEIREDO, M. G.; DOMINGUES, V. B. Microbiologia dos Lodos Ativados. **CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental** , p. 0–48, 1997.

FILHO, S. S. F. F. **Dimensionamento de decantadores secundários de sistemas de lodos ativados: uma abordagem computacional**. Revista DAE, v. 171, 1993.

FUNASA, F. N. DE S. Manual do Saneamento. In: **Manual do Saneamento**. 5ª ed. Brasília: [s.n.].

GARRIDO, J. M.; VAN BENTHUM, W. A. J.; VAN LOOSDRECHT, M. C. M. **Influence of dissolved oxygen concentration on nitrite accumulation in a biofilm airlift suspension reactor**. Biotechnology and Bioengineering, v. 53, n. 2. 1997.

GARSS, C. F. A. **Estudo de viabilidade econômica para atendimento do Parâmetro fósforo na Estação de Tratamento de Esgoto São João - Navegantes - DMAE**. 2019.

GASPAR, F. C.; MICHELAM, T. H.; FARAH, S. P. DOS S. **Sistemas de tratamento de efluente sanitário utilizados no município de Bebedouro/SP**. 2017.

HENZE, MOGENS.; HARREMOES, P.; JANSEN, J. L. C. **Wastewater treatment: biological and chemical processes**. 3. ed. [s.l.] Springer, 2002. v. 1

HORAN, N. J. **Biological wastewater treatment systems : theory and operation**. [s.l.] Chichester ; New York : Wiley, 1990.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 4ª ed. Rio de Janeiro: SEGRAC, 2005.

JUNIOR, M. A. B. DE A.; ALMEIDA, R. DE S.; SILVA, G. O. C. **Diagnóstico dos impactos ambientais provocados pelo lançamento de esgotos no Rio Piancó em Pombal/PB**. Revista GeoSertões, v. 2, n. 3, p. 75–93. 2017.

KICH, M.; BÖCKEL, W. J. **Análise de óleos e graxas em efluentes por espectrofotometria**. Estação Científica (UNIFAP), v. 7, n. 3. 2017.

LOPES, T. R. **Caracterização do esgoto sanitário e lodo proveniente de reator anaeróbio e de lagoas de estabilização para avaliação da eficiência na remoção de contaminantes**. Medianeira: [s.n.].

LOPES, W. F. DE A.; JÚNIOR, A. P. M. **Influência das condições naturais de pH sobre o índice de qualidade das águas (IQA) na bacia do Ribeirão de Carrancas**. VII Simpósio Nacional de Geomorfologia, p. 134–147, 2010.

MARAIS, G. V R.; LOEWENTHAL, R. E.; SIEBRITZ, I. P. **Observations Supporting Phosphate Removal by Biological Excess Uptake – A Review**. Water Science and Technology, v. 15, n. 3–4, p. 15–41. 1983.

MARGUTI, A. L.; FILHO, S. S. F.; PIVELI, R. P. Otimização de processos físico-químicos na remoção de fósforo de esgotos sanitários por processos de precipitação química com cloreto férrico. **Eng. sanitária e ambiental**, v. 13, n. 4, p. 395–404. 2008.

MARTINS, A. B. DE C.; ROCHA, J. P.; SANTANA, C. G. DE. Análise dos impactos causados pelo lançamento de efluentes domésticos não tratados e sua relação com a capacidade de autodepuração de um corpo hídrico. **Revista do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável**, 2018.

MENDONÇA, S. R.; MENDONÇA, L. C. **Sistemas sustentáveis de esgotos: Orientações Técnicas para Projeto e Dimensionamento de Redes Coletoras, Emissários, Canais, Estações Elevatórias, Tratamento e Reúso na Agricultura**. 2ª ed. São Paulo: Editora Blucher, 2017.

METCALF, E. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5. ed. [s.l.] AMGH, 2016.

MORTATTI, J.; VENDRAMINI, D.; HELDER DE OLIVEIRA; Avaliação da poluição doméstica fluvial na zona urbana do município de Piracicaba, SP, Brasil. **Revista Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**: v, v. 7, n. 2, 2012.

MULKERRINS, D.; DOBSON, A. D.; COLLERAN, E. Parameters affecting biological phosphate removal from wastewaters. **Environment international**, v. 30, n. 2, p. 249–259, 2004.

ORSSATTO, F.; HERMES, E.; VILAS BOAS, M. A. Eficiência de remoção de óleos e graxas de uma estação de tratamento de esgoto sanitário, Cascavel-Paraná. p. 249–256, 2010.

PHILIPS, A. M. DE L. **Utilização de reator de biodiscos para tratamento de efluentes com altas concentrações de nitrogênio**. Florianópolis: Florianópolis, SC, 2008.

QASIM, S. R.; CHIANG, W. **Sanitary Landfill Leachate**. [s.l.] Routledge, 2017.

ROCHA, E. M. R. **Desempenho de um Sistema de Lagoas de Estabilização na Redução da Carga Orgânica do Percolado Gerado no Aterro Muribeca (PE)**. Recife: [s.n.].

SCALIZE, P. S.; OLIVEIRA, S. C. DE; LEITE, W. C. DE A. Correlação entre os valores de DBO e DQO no afluente e efluente de duas ETEs da cidade de Araraquara. **VIII Exposição de Experiências Municipais em Saneamento**, 2004.

SEDLAK, R. I. **Phosphorus and Nitrogen Removal from Municipal Wastewater : Principles and Practice, Second Edition**. 2. ed. New York: The Soap Detergent Association, Lewis Publisher, 1991.

SHAMS, D. F.; SINGHAL, N.; ELEFSINIOTIS, P. Effect of feed characteristics and operational conditions on treatment of dairy farm wastewater in a coupled anoxic-upflow and aerobic system. **Biochemical Engineering Journal**, v. 133, p. 186–195. 2018.

SILVA, E. C. G.; PAZ, T. L. D. C.; ARAÚJO, D. M. F. MONITORAMENTO DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS PARA AVALIAÇÃO DO EFLUENTE TRATADO PROVENIENTE DE UMA ETE. **56ª CBQ**, 2017.

SOUZA, T. N. DE. **Influência da concentração de alcalinidade e relação c/n no processo de nitrificação e desnitrificação simultânea de efluente de microcervejaria em um reator de leito estruturado**. Ponta Grossa: [s.n.].

STUKENBERG, J. R.; RODMAN, L. C.; TOUSLEE, J. E. Activated Sludge Clarifier Design Improvements. **Journal (Water Pollution Control Federation)**, v. 55, n. 4, p. 341–348, 1983.

TEIXEIRA, M. B. **Manejo de esgotos sanitários: alternativas para loteamento popular em Porto Alegre**. Porto Alegre: [s.n.].

TOMIELLO, E. C. **Análise dos resíduos sólidos de desarenador do tratamento preliminar de esgotos sanitários da cidade de Maringá-PR**. Maringá: [s.n.].

TUCCI, C. E. M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**. [s.l.] Ministério das Cidades - Global Water Partnership - Wolrd Bank - Unesco, 2005.

VALENTE, J. P. S.; PADILHA, P. M.; SILVA, A. M. M. Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu - SP. **Eclética Química**, v. 22, p. 49–66, 1997.

VILLAVARDE, S. Influence of pH over nitrifying biofilm activity in submerged biofilters. **Water Research**, v. 31, n. 1997.

VON SPERLING, M. **Lagoas de Estabilização**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1996a.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados**. 3. ed. [s.l.] Editora UFMG, 2012.

VON SPERLING, MARCOS. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996b.

WEF, W. E. F. Nutrient Removal: WEF MoP No. 34. **Nutrient Removal**, v. 86, p. 57–102, 2011.

WEF, W. E. FEDERATION. Biological and chemical systems for nutrient removal. p. 399, 1998.

ZOPPAS, F. M.; BERNARDES, A. M.; MENEGUZZI, Á. Parâmetros operacionais na remoção biológica de nitrogênio de águas por nitrificação e desnitrificação simultânea. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 1, p. 29–42. 2016.

## APÊNDICE A

Figura A1: Figura esquemática da estação de tratamento de esgoto em estudo.

