

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE QUÍMICA**

Carlos Fabiano Alteneta Garss

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA ATENDIMENTO DO
PARÂMETRO FÓSFORO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO SÃO
JOÃO - NAVEGANTES - DMAE**

**Porto Alegre
2019**

Carlos Fabiano Alteneta Garss

**ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA ATENDIMENTO DO
PARÂMETRO FÓSFORO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO SÃO
JOÃO NAVEGANTE - DMAE**

Monografia apresentada junto à atividade de ensino “Projeto tecnológico” do curso de Química Industrial, com requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Química Industrial.

Prof. Dr. João Henrique Zimnoch dos Santos
Orientador

Porto Alegre
2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Dr. Rui Vicente Oppermann
Vice-reitora: Profa. Dra. Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE QUÍMICA

Diretor: Prof. Dr. Jairton Dupont
Vice-diretor: Prof. Dr. Marcelo Priebe Gil

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

Garss, Carlos Fabiano Alteneta
ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA
ATENDIMENTO DO PARÂMETRO FÓSFORO NA ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ESGOTO SÃO JOÃO - NAVEGANTES
– DMAE / Carlos Fabiano Alteneta Garss – 2019.

53 f.:il.

Orientador (a): João Henrique Zimnoch dos Santos
Monografia (Projeto Tecnológico) – Universidade Federal do
Rio Grande do Sul. Porto Alegre, BR – RS, 2019.

1. Remoção. 2. Eficiência. 3. Fósforo. I. SANTOS; João
Henrique Zimnoch dos e. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS
com os dados fornecidos pelo autor.

Instituto de Química da UFRGS

Av. Bento Gonçalves, 9500. Bairro Agronomia
CEP: 91501-970 – Porto Alegre – RS
Telefone: 3308-6302
E-mail: atendimento_iq@ufrgs.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha esposa, Patrícia Sant'Ana, e meu filho, Lucas Garss, pela compreensão nos momentos em que não pude estar com eles. Agradeço a população que pelos impostos pagos podem dar oportunidade a pessoas, como eu, a estudarem em uma Universidade pública e de qualidade como a UFRGS.

Em especial agradeço ao professor doutor João Henrique Zimnoch dos Santos que aceito me orientar neste trabalho tendo como escopo a inclusão de operações unitárias no processo de tratamento de esgoto da ETE São João - Navegantes do Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre.

Agradeço, também, a empresa Ambientaly por disponibilizar o técnico Fausto Hechsel para acompanhar os testes e pelo fornecimento dos coagulantes, cloreto férrico, PAC e sulfato de alumínio que tornaram possível a avaliação da remoção de fósforo na ETE.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo a avaliação das potencialidades e limitações da adaptação do processo de remoção de fósforo total na estação de tratamento de esgoto (ETE) São João - Navegantes (SJN) do Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) de Porto Alegre - RS. A remoção de fósforo na ETE SJN tem por intuito o cumprimento da Resolução CONSEMA 355/2017, que limita o lançamento de fósforo total em 1 mg.L^{-1} ou 75% de remoção e pretende com esta ação diminuir a eutrofização do lago Guaíba. A eutrofização, segundo Sperling (2005), é um fenômeno que consiste no crescimento excessivo de fitoplâncton, cianobactérias, plantas flutuantes, por exemplo, que causam interferências nos usos desejáveis do recurso hídrico. A pesquisa realizada constatou que há disponibilidade dos coagulantes sulfato de alumínio, policloreto de alumínio e cloreto férrico na grande Porto Alegre e que o coagulante que apresentou melhor remoção foi o cloreto férrico com a eficiência de 95,5%, sendo utilizado uma concentração de 40 mg.L^{-1} . Para a adequação do processo será necessário à instalação de dois tanques com capacidade de 100m^3 , uma centrifuga, válvulas e tubos, ao custo de R\$ 821.914,65, incluso a mão de obra. O custo de operação mensal com a compra do coagulante e remoção do sólido foi estimado em R\$ 58.837,55 que representa 1,16% da arrecadação do DMAE, em mês, relativo à tarifa de esgoto. Pode-se concluir que a proposta de adequação mostrou-se uma solução viável, para o problema de remoção de fósforo na ETE SJN, tanto econômica quanto ambiental.

Palavras-chave: Remoção. Eficiência. Fósforo.

STUDY FOR PHOSPHORUS REMOVAL IMPLEMENTATION IN THE SEWAGE TREATMENT STATION JOÃO NAVEGANTE - DMAE

ABSTRACT

The present work aims to evaluate the potentialities and limitations of the adaptation of the total phosphorus removal process at the São João - Navegantes sewage treatment plant (SJN) of the Porto Alegre Municipal Department of Water and Sewage (DMAE). Phosphorus removal at SJN is intended to comply with Resolution CONSEMA 355/2017, which limits the release of total phosphorus to 1 mg.L⁻¹ or 75% removal and intends to reduce the eutrophication of Lake Guaíba. Eutrophication, according to Sperling, is a phenomenon consisting of overgrowth of phytoplankton, cyanobacteria, floating plants, for example, which cause interference with the desirable uses of water resources. The research found that there is availability of aluminum sulfate coagulants, aluminum polychloride and ferric chloride in Porto Alegre and that the coagulant that showed the best removal was ferric chloride with an efficiency of 95.5%, using a concentration of 40%. mg.L⁻¹. For the adequacy of the process it will be necessary to install two tanks with a capacity of 100m³, a centrifuge, valves and tubes, at a cost of R\$ 821,914.65, including labor. The monthly operating cost with the purchase of coagulant and solid removal was estimated at R\$ 58,837.55, which represents 1.16% of the monthly DMAE collection related to the sewage tariff. It can be concluded that the adequacy proposal proved to be a viable solution to the economic and environmental phosphorus removal problem at the SJN.

Keywords: Removal. Efficiency. Phosphor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação do ciclo do fósforo na natureza.	5
Figura 2: Formas do fósforo em corpos hídricos naturais.	6
Figura 3: Representação simplificada de uma ETE com o sistema de remoção de poluentes por processo de lagoas.	10
Figura 4: Representação simplificada do funcionamento de uma ETE com o processo anaeróbio por reator UASB.	11
Figura 5: Representação simplificada do funcionamento de uma ETE com o processo aeróbio por lodo ativado.	11
Figura 6: Fluxograma do processo da ETE São João Navegantes.	13
Figura 7: Representação esquemática do processo de remoção de fósforo segundo Maroneze, 2014.	14
Figura 8: Representação esquemática do processo de remoção de fósforo que serão pesquisadas na ETE SJN.	21
Figura 9: Aparelho de Jar-teste.	24
Figura 10: Aparelho de medição de pH - pHmetro.	25
Figura 11 : Aparelho para medição de turbidez - Turbidímetro.	26
Figura 12: Aparelho da análises de fósforo total, ferro total e alumínio total - Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES)	26
Figura 13: Esboço da planta baixa da ETE na situação atual (fora de escala).	34
Figura 14: Esboço da planta baixa da ETE com as adaptações para a inclusão da remoção de fósforo (fora de escala).	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classe trófica em relação à concentração de fosforo total.....	7
Tabela 2: Limite de lançamento das concentrações de fósforo para ETE por faixa de Vazão.....	20
Tabela 3: Resultados das análises de Turbidez, pH, Ferro total, Alumínio total e Fósforo total.....	29
Tabela 4: Remoção do fosforo total (%) em relação à concentração no afluente da ETE e o aumento da remoção com o uso de coagulantes em relação à remoção de fósforo sem a adição de coagulante.....	30
Tabela 5: Resultados das análises de pH, Turbidez, ferro total, alumínio total e fósforo total para os testes nas concentrações 40 e 50 mg.L ⁻¹ para cloreto férrico...	31
Tabela 6: Remoção do fosforo total (%) em relação à concentração no afluente da ETE com o uso de coagulantes.	31
Tabela 7: Custos de materiais, equipamentos e mão de obra para a implantação do sistema de remoção de fósforo na ETE SJN.....	36
Tabela 8: Custos operacionais para a remoção de fósforo na ETE SJN em um mês de operação.....	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADP	Difosfato de Adenosina
ATP	Trifosfato de Adenosina
BID	Banco Interamericano de Desenvolvimento
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgotos
EBE	Estação de Bombeamento de Esgoto
EBPR	Remoção Biológica de Fósforo Avançada
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
MCA	Metros de Coluna de Água
NADP	Fosfato Dinucleotídeo de Adenina e Nicotinamida
PAC	Policloreto de Alumínio
PHA's	Polihidroalcanoatos
Pi	Polifosfato
RAFA	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente
RPM	Rotações por Minuto
SES	Sistema de Esgotamento Sanitário
SJN	São João Navegantes
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> do inglês RAFA

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	2
2.1. Objetivo geral.....	2
2.2. Objetivos específicos.....	2
3. DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS (DMAE)	3
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1. Fósforo na natureza.....	5
4.2. Esgotos.....	8
4.3. Estação de Tratamento de Esgoto Doméstico.....	8
4.3.1. Tipos de ETEs.....	9
4.3.2. Processo de Tratamento na ETE SJN	12
4.4. Tipos de Processos para Remoção de Fósforo em ETEs	13
4.4.1. Remoção Biológica de Fósforo	14
4.4.1.1. Remoção de Fósforo por Sistemas Bacterianos.....	14
4.4.1.2. Remoção de Fósforo por Macrófitas.....	15
4.4.1.3. Remoção de Fósforo por Microalgas	15
4.4.2. Remoção Química de Fósforo.....	16
4.4.2.1. Remoção de Fósforo por Adsorção	16
4.4.2.1.1. Remoção de Fósforo por Precipitação	16
4.4.2.1.1.1. Remoção de Fósforo por Precipitação com Ferro.....	17
4.4.2.1.1.2. Remoção de Fósforo por Precipitação com Alumínio.....	17
4.4.2.1.1.3. Remoção de Fósforo por Precipitação com Cálcio	18
4.4.2.1.1.4. Remoção de Fósforo por precipitação com Magnésio	18
4.4.2.2. Remoção de Fósforo por Precipitação	16
4.4.2.2.1. Remoção de Fósforo por Precipitação com Ferro.....	17
4.4.2.2.2. Remoção de Fósforo por Precipitação com Alumínio.....	17
4.4.2.2.3. Remoção de Fósforo por Precipitação com Cálcio	18
4.4.2.2.4. Remoção de Fósforo por precipitação com Magnésio	18
4.4.3. Comparação dos Processos de Remoção de Fósforo.....	18
4.5. Legislação Ambiental	19
4.6. Problematização.....	20
5. METODOLOGIA.....	22
5.1 Caracterização da Pesquisa	22
5.2 Coleta de dados	22
5.3 Análise de Dados	22
5.4 Método	23
5.4.1 Mapeamento da disponibilidade dos Coagulantes.....	23
5.4.2 Eficiência de Remoção do Fósforo	24
5.4.3 Análise Laboratorial.....	24
5.4.3.1 Análise de pH	25
5.4.3.2 Análise de Turbidez.....	25
5.4.3.3 Análise de Alumínio total, Ferro total e Fósforo total.....	26
5.4.4 Esboço da Adaptação do Processo de Remoção de Fósforo.....	27
5.4.5 Análise de Custos	27
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
6.1. DISPONIBILIDADE COMERCIAL DE COAGULANTES.....	28
6.2. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE COAGULANTES	28
7. PROPOSTA DE ADAPTAÇÃO DA ETE	33
8. ANÁLISE DE CUSTOS	35
9. CONCLUSÃO	38
REFERÊNCIAS.....	40

1. INTRODUÇÃO

Em 2018, a situação do saneamento básico, modalidade esgotamento sanitário, no Brasil, conforme o Instituto Trata Brasil, aponta que a coleta de esgoto doméstico atende 52,3% da população e desse esgoto coletado são tratados, em nível secundário, aproximadamente, 45,1% do esgoto coletado. (Trata Brasil, 2018). O tratamento em nível secundário tem o objetivo de reduzir a carga orgânica e patogênica do esgoto doméstico. Este tratamento traz muitos benefícios, mas não remove os nutrientes, nitrogênio e fósforo, os grandes causadores da eutrofização nos corpos hídricos (BRASIL, 2008).

A eutrofização é definida como o crescimento excessivo de algas que causa diminuição do oxigênio dissolvido no corpo hídrico. A eutrofização ocorre principalmente em represas, lagos e lagoas, devido ao excesso de nutrientes, principalmente, nitrogênio e fósforo, provenientes dos esgotos domésticos não tratados ou parcialmente tratados (nível secundário) (BRASIL, 2008).

Para minimizar a eutrofização dos corpos hídricos, o Estado vem incentivando os municípios a tratarem seus esgotos domésticos de modo a remover os nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo. O município de Porto Alegre conta com 11 Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), cinco de pequeno porte, que até 2035 serão desativadas e seus afluentes serão encaminhados para ETEs maiores: três com o sistema de tratamento por lagoas e três de grande porte; duas que removem nutrientes e um que não possui remoção de nutrientes: a ETE São João Navegantes (SJM).

O escopo do presente trabalho centra-se no delineamento de adaptação da ETE São João Navegantes para remover o fósforo, tendo em vista que a ETE já remove o nitrogênio amoniacal. Este ajuste de operação leva em conta o tipo de coagulante mais adequado e as modificações tecnológicas e operacionais de forma a permitir que passe a fazer o tratamento em nível terciário.

Esse manuscrito está estruturado em nove partes. Na sequência, após a introdução, são apresentados os objetivos do trabalho, um breve histórico do DMAE, uma revisão bibliográfica; a metodologia de pesquisa, os resultados e discussões, conclusão, e referencias bibliográficas.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é avaliar as potencialidades e limitações da adaptação de um processo de remoção de fósforo total na etapa de decantação de uma estação de tratamento de esgoto (ETE), cujo sistema é lodo ativado, do DMAE.

2.2. Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho:

- mapear a disponibilidade de coagulantes comerciais disponíveis;
- avaliar a eficiência de remoção do fósforo pelos coagulantes disponíveis no processo de tratamento de esgoto, na etapa de decantação do processo de lodo ativado da ETE São João Navegantes (SJN) do DMAE. Os coagulantes serão avaliados com o objetivo de encontrar o mais eficiente com relação: a menores valores de turbidez, pouca alteração nos valores de pH, alumínio total e ferro total; e maior eficiência de remoção de fósforo total.
- propor esboço de adequação das etapas/processos para inclusão no sistema de tratamento da ETE para remoção de fósforo; e
- avaliar os custos da implantação das etapas/processos de remoção de fósforo para adequação no processo para atendimento da Resolução CONSEMA 355/2017.

3. DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTOS (DMAE)

Em 15 de dezembro de 1961 foi criada a autarquia da prefeitura de Porto Alegre, Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) pela Lei Nº 2.312. A criação deve-se à tomada de recurso, no valor de US\$ 3,15 milhões, pelo município e em contrapartida o Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) exigiu a criação de um Departamento de Saneamento. Essa autarquia era responsável pelo abastecimento de água potável e esgotamento dos esgotos cloacais e pluviais.

Atualmente o DMAE abastece 100% dos porto-alegrenses com água tratada e 87,7% da população dispõem do serviço de coleta de esgoto, sendo que a capacidade de tratamento de esgotos é de até 75%. O Departamento Municipal de Água e Esgoto tem sua sede na Rua 24 de Outubro, nº 200, Bairro Moinhos de Vento – Porto Alegre/RS. O Departamento Municipal de Águas e Esgotos (DMAE) tem como missão: prestar serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário com qualidade, sendo social e ambientalmente responsável. Em sua visão quer ser reconhecido pela excelência na prestação de serviços públicos de abastecimento de água e esgotamento sanitário, traduzida pela universalização em 2035¹, na qualidade de água fornecida, no atendimento aos padrões do esgoto tratado, na eficiência de todos os seus processos e na relação transparente com a sociedade. O DMAE é o órgão responsável pela captação, tratamento e distribuição de água, bem como pela coleta e tratamento do esgoto sanitário doméstico em Porto Alegre. É da responsabilidade do Departamento fiscalizar e manter esses serviços, além de planejar e promover, de forma constante, seu melhoramento e ampliação, garantindo a infraestrutura necessária para o crescimento sustentável da cidade (DMAE, 2019).

Para a coleta e tratamento de esgoto doméstico o DMAE conta com 1.926 quilômetros de redes, 28 estações de bombeamento (EBE) e 11 Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). Dentre as ETEs temos: cinco de pequeno porte, que até 2035 serão desativadas e seus afluentes serão encaminhados para ETEs maiores; três com o sistema de tratamento por lagoas; três de grande porte: duas com sistemas mistos de RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente) ou UASB do inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, lodo ativado e remoção de nutrientes; e

¹ A universalização em 2035 significa atingir 100% de abastecimento de água e coleta de esgoto para população de Porto Alegre.

um ETE de sistema de lodo ativado sem remoção de nutrientes, nitrogênio e fósforo, a ETE São João Navegantes.

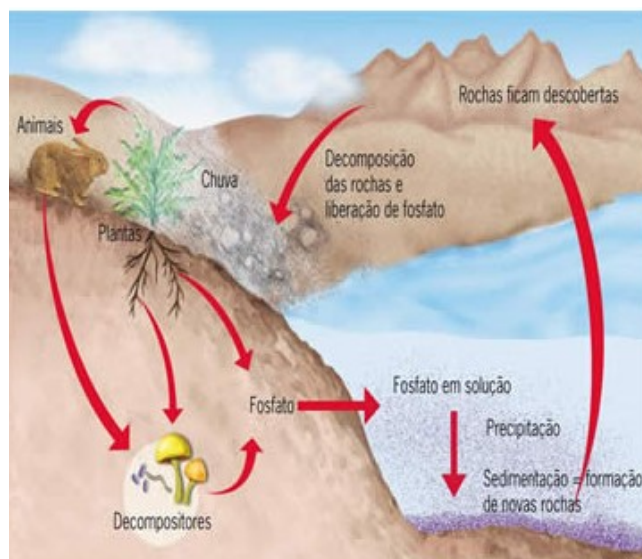
A seguir, serão abordadas as formas do fósforo na natureza e problemas do seu excesso, definição de ETEs e processo de remoção do fosforo em ETEs.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Fósforo na natureza

O fósforo é um dos elementos químicos essenciais para o desenvolvimento microbiológico, devido à participação nas reações bioquímicas do sistema ATP-ADP. O ciclo biogeoquímico do fósforo é mais simples que os ciclos do carbono, nitrogênio e enxofre, pois não apresenta a fase gasosa livre na atmosfera (Fosfina, PH_3). Essa fase somente ocorre em condições anaeróbicas especiais. Os percursores do ciclo do fósforo são efetuados nas formas de ânions ortofosfatos: H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} e PO_4^{3-} (GOMES *et.al.*, 2008). Os ortofosfatos ou fosfatos são incorporados ao solo pela excreção de animais e pela ação dos decompositores sob a matéria morta. Com a ação de chuvas e da erosão de rochas, o fosfato é gradativamente drenado para corpos hídricos e por meio de processos geológicos, de milhares de anos, elevação do leito no mar ou o rebaixamento do nível das águas, este fosfato retorna para o ciclo, como podemos observar na Figura 1. O ciclo do fósforo está dividido em duas escalas temporais: a primeira, de curta duração, onde o principal elemento de propagação são os seres vivos (atividades da indústria, da agricultura e despejos de esgotos sem o devido tratamento); e a segunda, de longa duração, que envolve os aspectos abióticos do ambiente.

Figura 1: Representação do ciclo do fósforo na natureza.

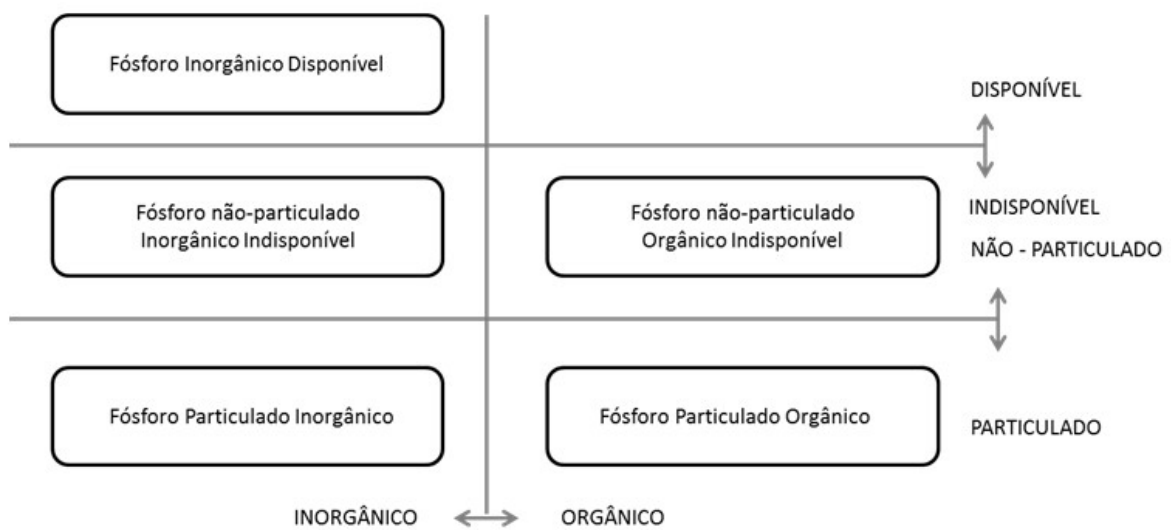


Autor: Krukemberghe Divino Kirk da Fonseca Ribeiro (reproduzido do site: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/biologia/ciclo-fosforo.htm>, Acesso em:

15/07/2019).

O fósforo em corpos hídricos naturais pode ser encontrado em quatro formas (CHAPRA, 1997): solúvel reativo (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} e PO_4^{3-}); particulado orgânico (organismos vivos e detritos); particulado inorgânico (apatita, compostos argilosos e complexos de carbonato de cálcio); e não particulado inorgânico (fosfatos condensados). A Figura 2 representa o principal ciclo que ocorre em corpos hídricos naturais proposta por Chapra (1997).

Figura 2: Formas do fósforo em corpos hídricos naturais.



Autor : Chapra, 1997 adaptado.

O fósforo total é o somatório de todas as formas de fósforo encontradas em uma amostra. Os níveis tróficos são definidos como: (i) oligotrófico, alta transparência e baixa produtividade de biomassa; (ii) mesotrófico, produtividade intermediária de biomassa; e eutrófico, (iii) elevada produtividade de biomassa (SPERLING, 2005). A concentração do parâmetro fósforo total pode estabelecer a classe trófica do corpo hídrico. A Tabela 1 apresenta classe trófica com relação à concentração de fósforo total.

Tabela 1: Classe trófica em relação à concentração de fósforo total.

Classe Trófica	Concentração de fósforo total ($\mu\text{g.L}^{-1}$)
Oligotrófica	<10
Mesotrófica	10 – 35
Eutrófica	>35

Autor: ISTVÁNOVICS (2009) P.316

Como consequência de altas concentrações de fósforo, acima de $35 \mu\text{g.L}^{-1}$, no corpo hídrico há um aumento da biomassa provocando a eutrofização. Especificamente com relação ao lago Guaíba, esse é classificado como de mesotrófico a eutrófico (Andrade, 2014). A eutrofização é um fenômeno que consiste no crescimento excessivo de fitoplâncton, cianobactérias, plantas flutuantes o qual causam interferências nos usos desejáveis do recurso hídrico (SPERLING, 2005). A Eutrofização é causada pelo excesso de nutrientes como nitrogênio e fósforo. O fenômeno ocorre principalmente quando a velocidade de escoamento do corpo d'água é lenta, proporcionando o acúmulo dos nutrientes e crescimento descontrolado da flora. A eutrofização diminui a biodiversidade, pois aumenta os níveis de toxicidade e reduz a transparência da água (MONTOVANI, 2013). Pode-se citar como efeitos da eutrofização (HALLS, 2011):

- Anaerobiose (ausência ou baixa concentração de oxigênio dissolvido), que causa a morte da vida aquática e libera gases tóxicos, tais como gás sulfídrico o qual possui odor desagradável; a baixa concentração do oxigênio pode causar mortandade de peixe e impossibilidade de pesca;

- Crescimento excessivo de biomassa, tais como: (i) cianobactérias que em sua decomposição formam 2-metilisoborneol (MIB) e *trans*-1,10-dimetil-*trans*-9-decalol (geosmina) que causam “cheiro e gosto de terra e mofo” (JULIANO, 2010) e diminuindo a transparência da água; e (ii) Macrófitas: vegetais que habitam desde brejos até ambientes totalmente submersos impossibilitando o uso para navegação, esportes aquáticos; e

- Maior dificuldade e elevação nos custos de tratamento da água: tendo em vista a presença de elevada concentração de algas e produtos de decomposição. A

empresa responsável pelo tratamento de água deverá utilizar mais insumos para o tratamento. Os insumos diminuem ou removem as algas, cor, sabor e odor. Também será necessária maior frequência na limpeza dos filtros.

Tendo em vista o exposto acima, para minimizar a eutrofização é imprescindível a manutenção de nossos corpos hídricos. A legislação atuante estabelece padrões rigorosos para controle de fósforo no efluente tratado a ser lançado nos corpos receptores (CHIES, 2016).

O fósforo presente nos corpos hídricos pode ter basicamente três origens: natural (solo e decomposição de vegetais); atividades agrárias (excesso de adubação do solo) e ocupação urbana (esgoto cloacal e pluvial) (SPERLING, 2005).

4.2. Esgotos

Segundo o Manual de Saneamento Básico (2012) esgoto é a fração líquida final de um processo, que não é utilizada, chamada também de efluente. Os tipos de esgotos podem ser: pluvial, industrial e doméstico.

O esgoto pluvial é basicamente constituído de água da chuva o qual é coletado pelas bocas coletoras ou sarjetas e conduzidos por dutos subterrâneos até galerias pluviais. As galerias direcionam este esgoto para os rios, córregos e mares, evitando acúmulos de águas nas vias públicas.

O esgoto industrial são resíduos líquidos das indústrias e demais fontes, o qual podemos citar o efluente oriundo de hospitais e clínicas. Este esgoto varia em composição, pois depende do processo da empresa. As empresas devem possuir uma estação de tratamento própria, para que, no fim do processo, a água possa apresentar condições de retornar aos corpos hídricos.

O esgoto doméstico são efluentes provenientes das residências. Estes efluentes são: escoamento da água do banho, da lavagem de roupas, de louças e da descarga do vaso sanitário. Este tipo de efluente é conduzido através de tubulações em rede até uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE).

4.3. Estação de Tratamento de Esgoto Doméstico

A Estação de Tratamento de Esgoto Doméstico ou simplesmente Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) pode ser definida como unidade operacional do sistema de esgotamento sanitário (SES). O objetivo da ETE é remover as cargas poluentes do esgoto doméstico com a utilização de processos físicos, químicos e/ou

biológicos. Após o tratamento, o produto final (efluente tratado) retorna para o ambiente (corpo hídrico) em conformidade com os padrões exigidos pela legislação ambiental.

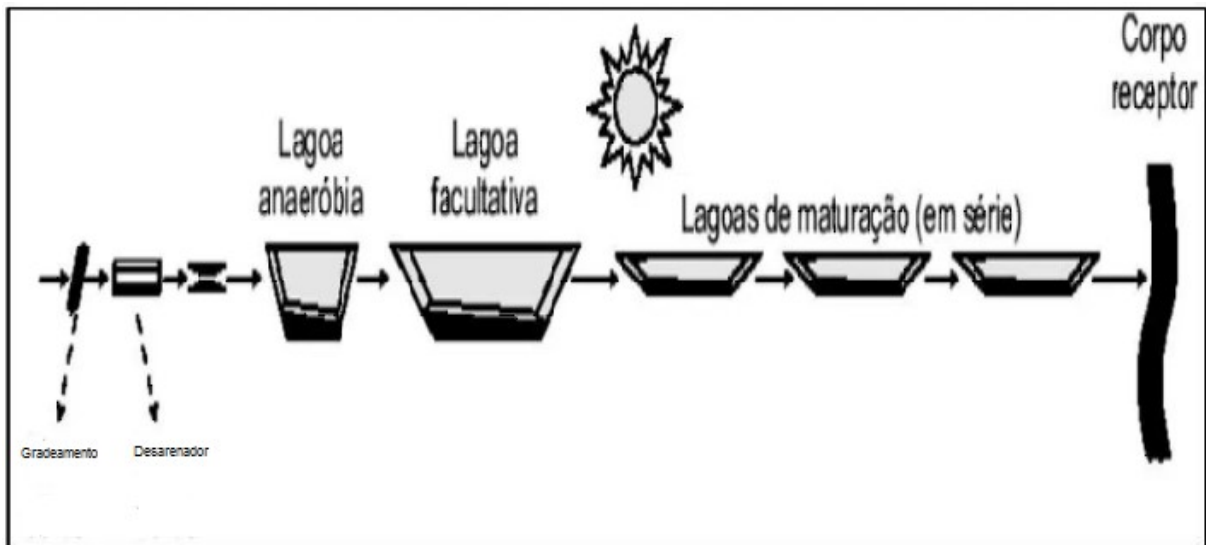
Segundo Sperling (2005), as ETEs podem ser divididas em vários tipos, mas basicamente, em três tipos, conforme o processo utilizado. Os tipos são: lagoas; tanques anaeróbios e tanques aerados (lodo ativado). Algumas ETEs, no processo de remoção de poluentes, podem utilizar-se de tanques anaeróbios e tanques aerados.

4.3.1. Tipos de ETEs

Todas as ETEs possuem tratamento preliminar que remove materiais grosseiros e areia. Para a remoção de materiais grosseiros, tais como: garrafas plásticas, madeiras e outros, para esta remoção é utilizado um equipamento chamado grade ou etapa de gradeamento. Para remoção de areias é utilizado o equipamento chamado de desarenador que pode ser um decantador comum ou um decantador com insuflação de ar para remoção de gorduras.

As ETEs a qual o processo de remoção de poluentes é efetuado por lagoas apresentam o gradeamento, desarenador e uma sequência de lagoas como mostra a Figura 3. Lagoas anaeróbias caracterizam por não apresentar oxigênio dissolvido abaixo da superfície da água. Lagoas Facultativas caracterizam-se pela presença de três zonas: zona anaeróbia, zona aeróbia e zona facultativa (há presença de bactérias anaeróbias e aeróbias responsáveis pela estabilização da matéria orgânica). As lagoas de maturação são responsáveis pela remoção de bactérias, coliformes, vírus e ovos de helmintos (SPERLING, 2005).

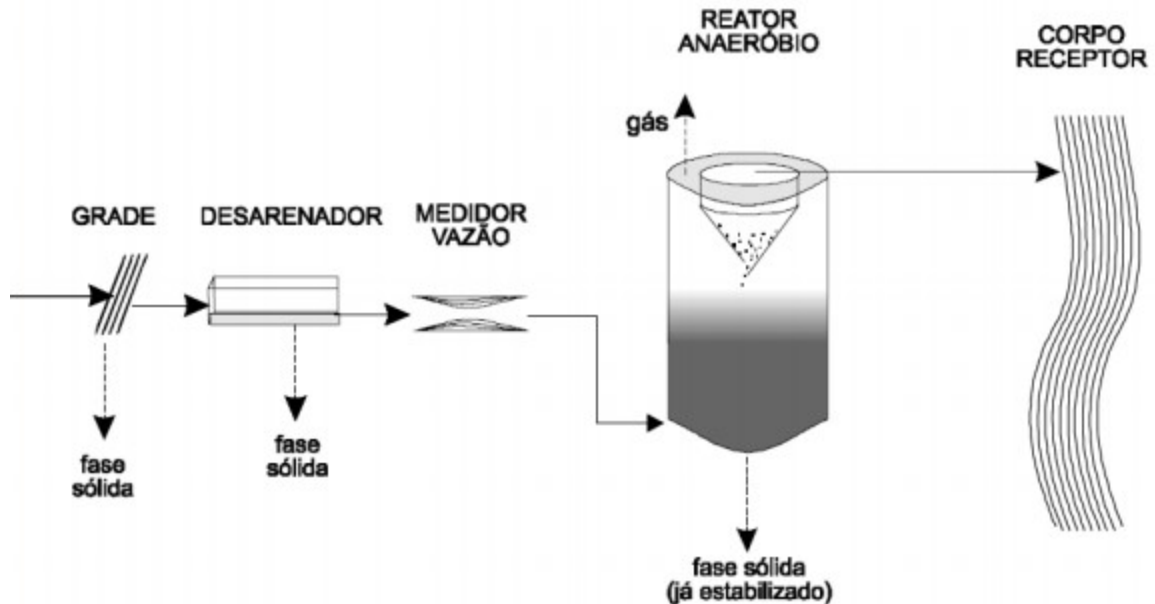
Figura 3: Representação simplificada de uma ETE com o sistema de remoção de poluentes por processo de lagoas.



Fonte: SPERLING, 2005. adaptado.

As ETEs que possuem tratamento de esgoto por processo anaeróbio são constituídas por gradeamento, desarenador e tanque anaeróbio conhecido como RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente) ou UASB do inglês (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). O RAFA consiste em um tanque onde o esgoto entra na parte inferior e passa por uma zona composta por uma manta lodo. Após a biodegradação e a digestão anaeróbia, os gases (metano, carbônico e sulfídrico), esses são encaminhados para o dispositivo separador de fases gás-sólido-líquido (SPERLING, 2005). A Figura 4 apresenta esquematicamente uma ETE com funcionamento por processo anaeróbio.

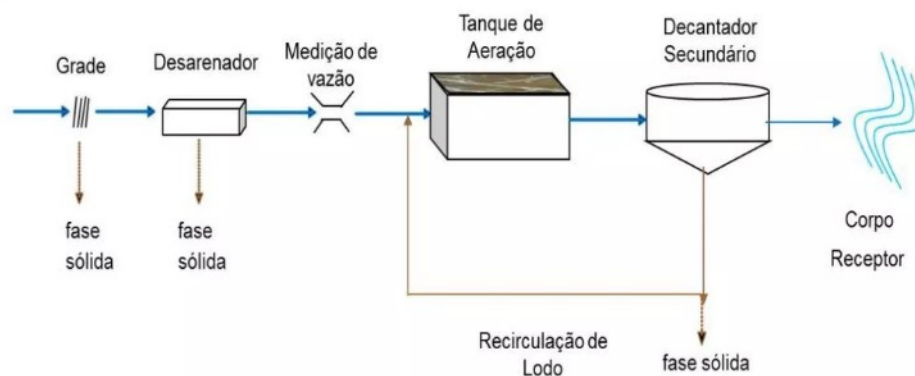
Figura 4: Representação simplificada do funcionamento de uma ETE com o processo anaeróbio por reator UASB.



Fonte: SPERLING, 2005.

As ETEs que possuem tratamento de esgoto por processo aeróbio, lodo ativado, são constituídas por gradeamento, desarenador e tanque aeróbio. O processo tem como base a oxidação da matéria orgânica, por bactérias aeróbias, pelo excesso de oxigênio em tanques. Após, o lodo é encaminhado para decantadores. A Figura 5 apresenta esquematicamente uma ETE que utiliza o processo de tratamento de esgoto aeróbio.

Figura 5: Representação simplificada do funcionamento de uma ETE com o processo aeróbio por lodo ativado.



Fonte: Disponível em: <https://www.tratamentodeagua.com.br/artigo/sistema-lodos-ativados/>. Acesso em 22/07/2019.

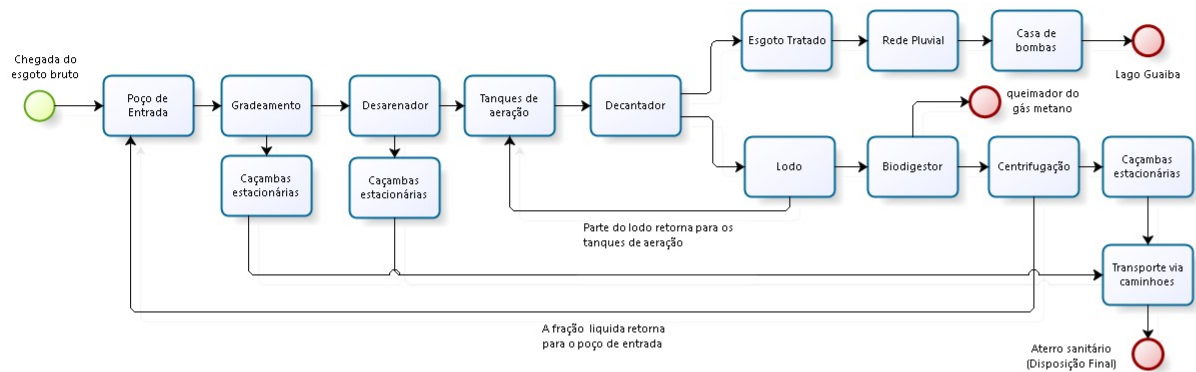
4.3.2. Processo de Tratamento na ETE SJN

A ETE localiza-se na Av. A.J. Renner, 495, ocupa uma área de 7,5 hectares, no bairro Humaitá e atende uma população de aproximadamente 150 mil habitantes nos bairros Vila Farrapos, Dona Teodora, Parque Humaitá, Aeroporto, Vila IAPI, São Geraldo, Navegantes, Auxiliadora, Higienópolis, São João e Santa Maria Goretti. O processo de remoção de carga poluente é efetuado por lodo ativado e não possui remoção de nutrientes, nitrogênio e fósforo. As características do processo são:

- Chegada do Esgoto na Estação: Por bombeamento;
- Pré-Tratamento: Gradeamento e Desarenação;
- Tratamento Primário: Não existe;
- Tratamento Secundário: Lodos ativados;
- Tratamento de Lodos: Digestão anaeróbia e desidratação em centrífuga;
- Desinfecção do efluente: Não existe; e
- Capacidade de tratamento: $444 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ ou $38.361,6 \text{ m}^3\cdot\text{dia}^{-1}$.

O esgoto bruto, afluyente, chega à ETE no poço de acumulação por bombeamento e passa pelo gradeamento para retirada de sólidos grosseiros. Através de bombas, o esgoto é conduzido para o desarenador o qual retira a areia. Após, o esgoto é encaminhado para os tanques de aeração com lodo ativado para reduzir a carga orgânica. Esta redução, também, diminui o nitrogênio e o fósforo, pois estes elementos são utilizados como fontes de energia pelas bactérias aeróbicas. A mistura de lodo e esgoto tratado é encaminhada para o decantador que separa a mistura por gravidade. O lodo é dividido em duas frações: a primeira retorna para os tanques de aeração e a segunda é encaminhada para o digestor anaeróbico, para a fração volátil transformar-se biologicamente em gás metano e este encaminhado para o queimador e após, o lodo restante é desidratado em centrifugas. O esgoto tratado (efluente) da ETE São João Navegantes tem como destino final o coletor geral pluvial do Bairro Humaitá (Canal Sul), o qual é drenado pela casa de bombas localizada na Auto Estrada BR101 (junto à Vila Farrapos), cujo lançamento é efetuado no Saco do Cabral, próximo à foz do rio Gravataí. O processo é ilustrado esquematicamente pelo fluxograma na Figura 6.

Figura 6: Fluxograma do processo da ETE São João Navegantes

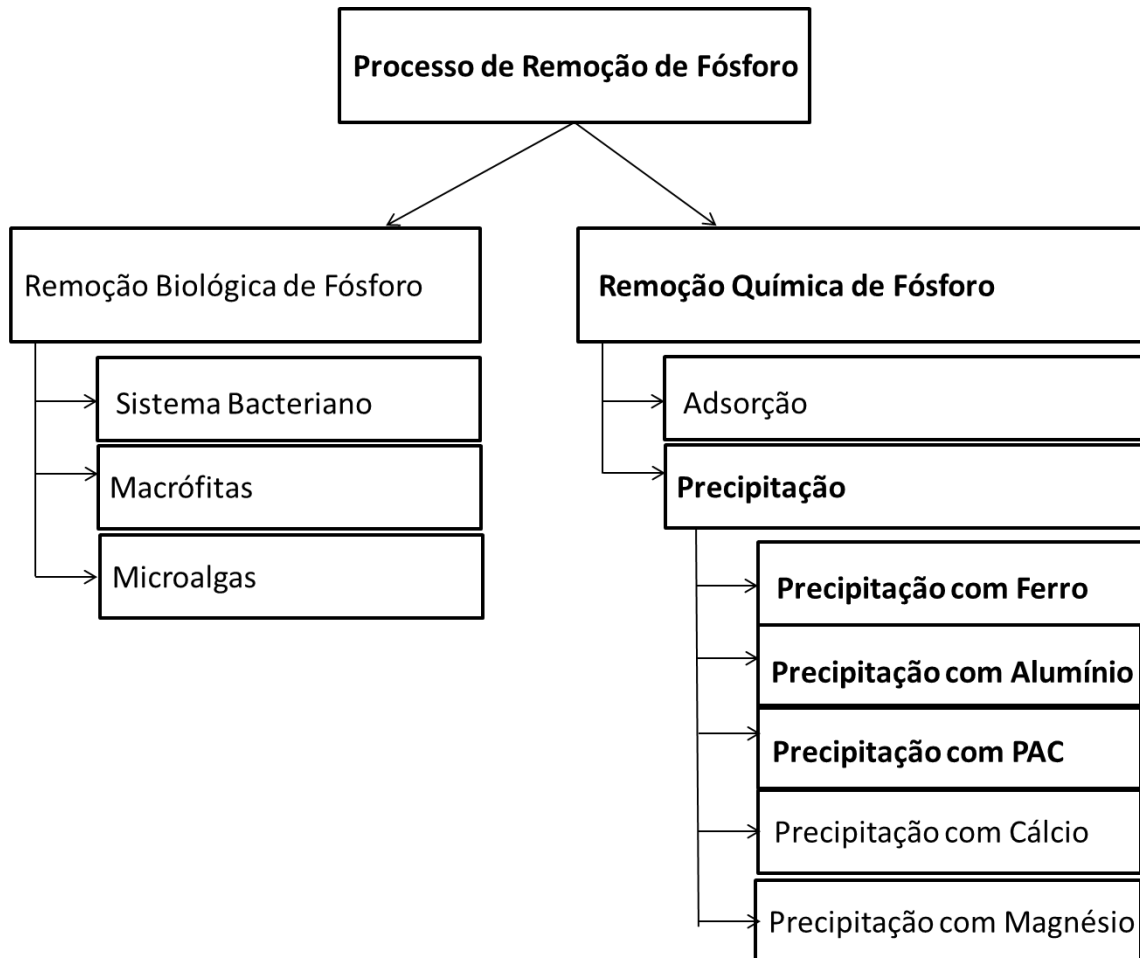


Fonte: autor.

4.4. Tipos de Processos para Remoção de Fósforo em ETEs

A remoção do fósforo em ETEs é de suma importância, devido aos problemas causados, sobretudo pela eutrofização dos corpos hídricos que recebem este efluente. Para a remoção de fósforo em ETE podemos elencar em duas classes: a remoção biológica e a química (MARONEZE *et. al.*, 2014). A remoção biológica é dada em três tipos de processos: por sistemas bacterianos, macrófitas e microalgas. Segundo Maroneze, a remoção química é efetuada por dois processos: por adsorção e precipitação química. Cabe salientar que a remoção por adsorção não ocorre reação química, portanto é uma remoção física, mas neste trabalho será classificada como o autor define. O processo de precipitação química pode ser efetuado adicionando ao efluente um sal de um metal (RITTMANN *et. al.*, 2011). A Figura 7 apresenta esquematicamente sobre os processos de remoção de fósforo segundo MARONEZE *et. al.*, 2014.

Figura 7: Representação esquemática do processo de remoção de fósforo segundo Maroneze, 2014.



Fonte: autor

4.4.1. Remoção Biológica de Fósforo

A remoção biológica consiste na capacidade de uma bactéria, alga ou vegetal acumularem, na sua estrutura, polifosfatos tendo como precursor o fosfato disponível (HENRIQUE, *et. al.*, 2010). Serão discorridos sobre os processos de remoção de fósforo utilizados sistemas bacterianos, macrófitas e microalgas.

4.4.1.1. Remoção de Fósforo por Sistemas Bacterianos

A remoção de fósforo, efetuada por bactérias heterotróficas que estão presentes no lodo, pode ocorrer em duas fases, de condições anaeróbias e aeróbias. Em condições anaeróbias, as bactérias, por falta de oxigênio, armazenam os ácidos graxos voláteis: acetato e o propionato, sob forma de quatro polihidroxialcanoatos (PHA's): polihidroxibutirato (constituído de acetato); polihidroxivalerato e polihidroxi-2-metilbutirato (constituídos de acetato e propionato);

e o polihidroxi-2-metilvalerato (constituído de propionato). Para a síntese dos PHA's é utilizada a energia da molécula de trifosfato de adenosina (ATP) e poder redutor da molécula de fosfato de dinucleotídeo de adenina e nicotinamida (NADP). Com a degradação do polifosfato, os ortofosfatos (Pi) são liberados para o meio da bactéria (MARTÍN *et.al.*, 2006).

Em condições aeróbias, com a presença de oxigênio, as bactérias, que em condições anaeróbias armazenaram os PHA's, capturam o polifosfato (Pi) do meio e, com o consumo de ATP, utilizam esta energia para o seu crescimento (MARTÍN *et.al.*, 2006).

Em alternância das condições anaeróbias e aeróbias, as bactérias acumulam o fósforo em sua constituição. Após o ciclo de vida, esta biomassa morta forma o lodo. O lodo é decantado e retirado do processo. Este processo é conhecido como Remoção Biológica de Fósforo Avançada (EBPR), do inglês *Enhanced Biological Phosphorus Removal* (FERREIRA, 2014).

4.4.1.2. Remoção de Fósforo por Macrófitas

Macrófitas são plantas aquáticas flutuantes existentes em corpos hídricos. Podemos citar como exemplos de macrófitas: capim-angola (*Brachiaria mutica*); aguapé (*Eichhornia crassipes*); alface d'água (*Pistia stratiotes*) e outros. Todas estas plantas aquáticas possuem raízes fasciculadas (POMPÊO, 2017). Estas raízes fasciculadas possuem grande área de absorção, facilitando assim a remoção do fósforo do meio aquático. O fósforo é um nutriente essencial para o crescimento das plantas.

O fósforo é retido pelas macrófitas na forma de fosfato, sendo este usado como recurso interno da planta. Com o crescimento da planta, o fosforo contido no efluente é absorvido. A absorção do fósforo pode chegar perto dos 100%, mas para que a remoção seja eficiente, estas plantas devem ser removidas do tanque periodicamente. Caso as macrófitas não sejam removidas, haverá um aumento da concentração de fósforo no meio (MARONEZE, 2014).

4.4.1.3. Remoção de Fósforo por Microalgas

As Microalgas são um grupo genérico usualmente composto por dez diferentes micro-organismos aquáticos. Estes grupos são: *Cyanophyta*, *Chlorarachniophyta*, *Glaucophyta*, *Euglenophyta*, *Cryptophyta*, *Prymnesiophyta*,

Dinophyta, Ochrophyta, Rhodophyta e Chlorophyta (ABALDE, 1995).

A remoção do fósforo é efetuada da seguinte maneira: as microalgas sintetizam os carboidratos pela fotossíntese. A fotossíntese é a captura de energia solar que é convertida em energia química na forma de ATP. A molécula de ATP é formada por uma base nitrogenada adenina, uma ribose e por três grupos fosfato (VIEIRA *et al.*, 2012). Assim como a remoção por macrófitas, a remoção pode chegar a 100%, caso haja remoção das microalgas do meio (MARONEZE, 2014).

4.4.2. Remoção Química de Fósforo

Segundo Maroneze (2014), a remoção química pode ser por adsorção ou precipitação química. A remoção do fósforo por adsorção baseia-se no acúmulo de fósforo na superfície do sólido, ligado por forças de Van Der Waals ou por ligação iônica. A precipitação química baseia-se na reação de um metal com o fosfato formando um sal insolúvel no meio.

4.4.2.1. Remoção de Fósforo por Adsorção

Segundo Dabrowski (2001) a adsorção por ser física ocorrendo pelas forças de Van Der Waals ou química onde o fosfato liga-se quimicamente com o adsorvente. Os principais materiais adsorventes são: carvão ativado, alumina ativada, zeólitas, polímeros sintéticos e adsorventes à base de sílica (MARONEZE, 2014).

O desempenho deste tipo de remoção é na ordem de 90%. Uma desvantagem da adsorção é o valor dos adsorventes, e por encontrar-se no lodo, não pode ser reativado. Uma das vantagens é a mistura de lodo e adsorvente rico em fósforo, o qual pode ser reaproveitado na agricultura como fertilizante, desde que esteja de acordo com os limites máximos estabelecidos a Resolução CONAMA 375/2006 (FANGMEIER, 2015).

4.4.2.1. Remoção de Fósforo por Precipitação

Ao adicionar sais metálicos bivalentes ou trivalentes no esgoto pode-se ter concorrentemente a precipitação e a coagulação. A precipitação é definida como a formação de um sólido durante uma reação formando um sólido insolúvel no meio. No caso da remoção do fósforo, o íon metálico reage com o fosfato formando um sal insolúvel de fosfato, isto acarreta na diminuição da alcalinidade e pH (RASÕES,

2008). A coagulação consiste em na formação de um colóide que pode ser liofóbico (inorgânico) ou liofílico (orgânico). O colóide liofóbico forma duas fase, sistema heterogêneo, com o esgoto, portanto podem ser separados. O colóide liofílico forma uma fase, sistema homogêneo, não pode ser separado por métodos convencionais (GUALBERTO, 2009). Tendo em vista a grande diversidade de constituintes do esgoto, a precipitação prevalece em relação à coagulação (GUALBERTO, 2009).

4.4.2.1.1. Remoção de Fósforo por Precipitação com Ferro

A remoção de fósforo por precipitação com ferro é baseada na reação de sais de ferro com o fosfato existente no esgoto. Os sais de ferro mais usados são cloreto férrico (FeCl_3), sulfato férrico ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$) e sulfato ferroso (FeSO_4) (MARONEZE, 2014).

As típicas reações do ion férrico (Fe^{3+}) e ferroso (Fe^{2+}) com o fosfato são, conforme representação na equação (1) e (2):



Mas devido à concorrência com o íon carbonato que se encontra disperso no meio, pode-se ter a reação, conforme representado na equação (3):



Segundo Bowker (1990), o coagulante de ferro pode ser aplicado em qualquer fase do tratamento de esgoto: na fase primária, remoção de sólidos suspensos ou na fase secundária, remoção de poluentes por reação bacteriana ou em ambas as fases. O processo de remoção de fósforo por precipitação com sais de ferro tem uma eficiência de até 95%.

4.4.2.1.2. Remoção de Fósforo por Precipitação com Alumínio

A remoção de fósforo por sulfato de alumínio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) ou policloreto de alumínio (PAC) depende da alcalinidade, sólidos suspensos e concentração do fosforo no efluente (TCHOBANOGLIOUS, 2016). A reação ocorre entre o alumínio presente no sal ou PAC com o fosfato resultando no sal de fosfato de alumínio que é insolúvel no meio, conforme representação da equação química (4).



Para o uso de alumínio tem-se um inconveniente que a coagulação prevalece sobre a precipitação. Portanto, para atingir uma eficiência de remoção de fósforo de aproximadamente 95% deverá ser utilizada maior quantidade de coagulante comparado com o coagulante de ferro (MOLOSSI, 2014).

4.4.2.1.3. Remoção de Fósforo por Precipitação com Cálcio

O uso do cálcio para a precipitação do fósforo é uma alternativa em relação aos metais ferro e alumínio, pois é um insumo de baixo custo e de fácil manuseio. A principal substância utilizada para este propósito é o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) (De-Bashan e Bashan, 2004).

A reação química do cálcio pode ser representada para equação (5):



O hidróxido de cálcio deve ser adicionado no efluente, pós-tratamento secundário para evitar entupimentos nos dispersores de oxigênio. O hidróxido de cálcio, primeiramente, reage com o bicarbonato existente ao qual precipita CaCO_3 . Conforme a reação acontece, o pH aumenta e com isso os íons de cálcio em excesso reagem com o fosfato, conforme representado na equação (5). A eficiência de remoção do fósforo pode alcançar até 95% (MARONEZE, 2014).

4.4.2.1.4. Remoção de Fósforo por precipitação com Magnésio

A precipitação do fósforo com sais de magnésio em efluentes tem sua utilização restrita, pois tem um valor elevado e para a reação ocorrer o meio deve ser alcalino. Em alguns casos, há uma preferência pelo uso do magnésio, pois a reação com o magnésio no efluente possibilita a remoção do nitrogênio e do fosforo, simultaneamente e o produto final é a estruvita ($\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). A estruvita é um fertilizante de liberação lenta de nitrogênio e fósforo e por isso tem grande valor comercial e excelente desempenho agrícola (MARONEZE, 2014).

A reação química do magnésio pode ser representada para equação (6):



4.4.3. Comparação dos Processos de Remoção de Fósforo.

Para os sistemas biológicos, as vantagens são: ausência de adição de produtos químicos, baixo custo, elevada remoção e remoção paralela de nitrogênio; e as entre as desvantagens, pode-se citar: complexidade operacional para sistemas

de remoção utilizando macrófitas, produção elevada de lodo e difícil recuperação do fósforo contido no lodo. Outra desvantagem é a necessidade de um tanque exclusivo para a operação e grandes áreas.

Para os sistemas químicos, as vantagens são: facilidade de operação, robustez e alta eficiência de remoção; e as desvantagens são: elevado custo operacional, geração de lodo, e elevado custo de reagentes. Dentre os coagulantes, pode-se citar que o ferro apresenta custo relativamente baixo em comparação com outros coagulantes e não há necessidade de um tanque exclusivo para a reação de precipitação.

4.5. Legislação Ambiental

No Brasil, a competência para dispor sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes é do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA ligado ao Ministério do Meio Ambiente. Segundo o Art. 17º da Resolução CONAMA nº 430, de 13 de Maio de 2011.

“O órgão ambiental competente poderá definir padrões específicos para o parâmetro fósforo no caso de lançamento de efluentes em corpos receptores com registro histórico de floração de cianobactérias, em trechos onde ocorra a captação para abastecimento público.”

No Rio Grande do Sul, a competência normativa sobre o lançamento do efluente é do Conselho Estadual de Meio Ambiente – CONSEMA. O CONSEMA é o órgão superior do Sistema Estadual de Proteção Ambiental de caráter deliberativo e normativo, responsável pela aprovação e acompanhamento da implementação da Política Estadual do Meio Ambiente que está subordinada à Secretária do Meio Ambiente e Infraestrutura.

Segundo a Tabela 2 do parágrafo único, do Art. 18º, da Resolução CONSEMA 355, de 13 de julho de 2017, que escalona por vazão os limites para lançamento de fósforo em efluentes que são de 4 a 1 mgP/L ou uma eficiência de 75% para todas as vazões.

Tabela 2: Limite de lançamento das concentrações de fósforo para ETE por faixa de Vazão.

Faixa de Vazão do efluente(Q) (m ³ .dia ⁻¹)	Fósforo Total	
	mg.L ⁻¹	Eficiência
Q < 1.000	4	75%
1.000 ≤ Q < 2.000	3	75%
2.000 ≤ Q < 10.000	2	75%
10.000 < Q	1	75%

Fonte: Resolução CONSEMA 355/2017. Adaptada.

O DMAE possui somente ETEs com vazões maiores de 10.000 m³.dia⁻¹. Portanto, todas as estações são enquadradas para lançamento de fósforo até 1mgP.L⁻¹. Para alcançar a eficiência e remoção de 1 mgP.L⁻¹ é necessário adaptar o processo. No caso prático, o DMAE possui ETEs de pequeno porte que serão ligadas a outras ETEs maiores portes que já possuem processo de remoção de fósforo à exceção da ETE SJN que não possui remoção de nutrientes.

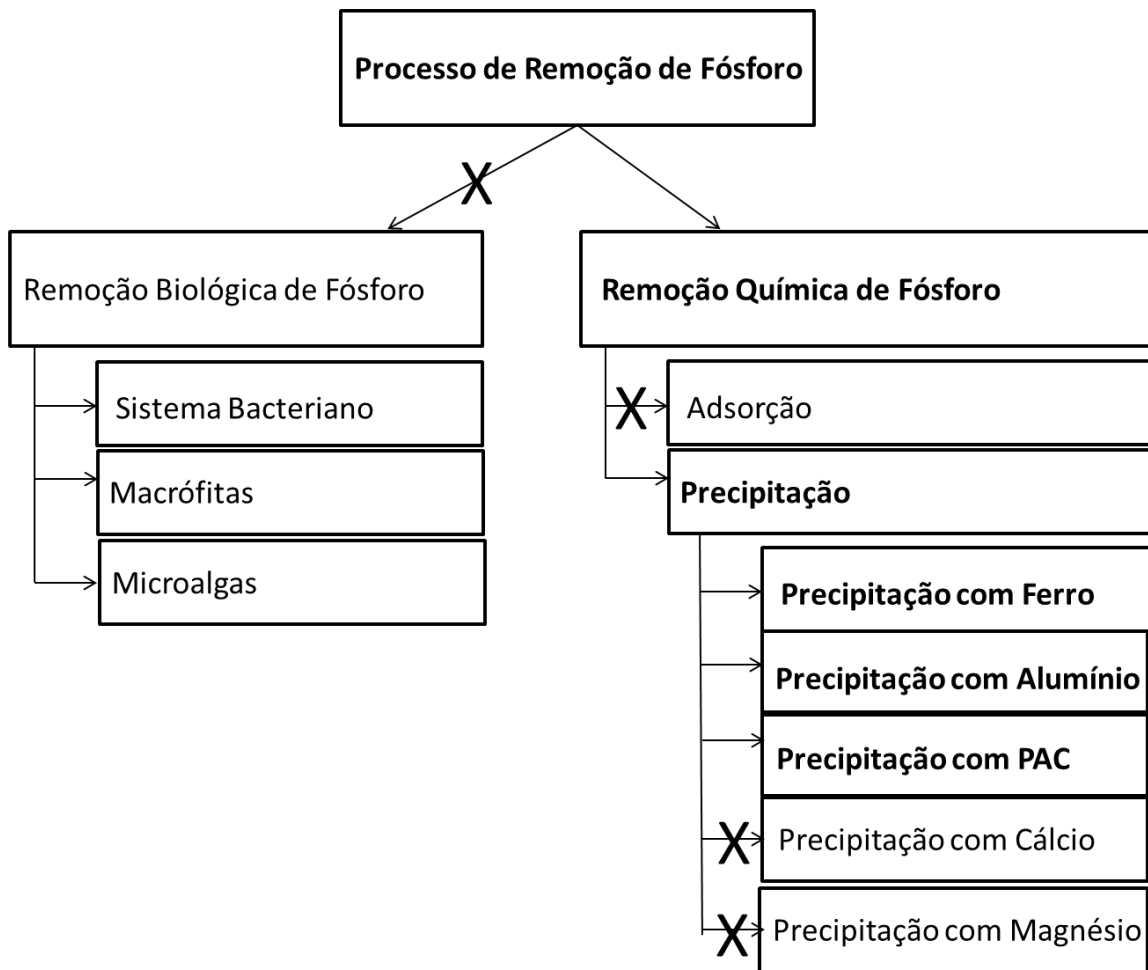
4.6. Problematização

Para a remoção de fósforo da ETE São João Navegantes foram pesquisados os processos de precipitação química, pois a remoção biológica necessita de espaço físico e a ETE não o dispõe. Para a remoção por adsorção, os produtos são de difícil manuseio, pois são sólidos.

Dentre os coagulantes, o hidróxido de cálcio foi descartado, por orientação da diretoria de tratamento do DMAE devido aos constantes entupimentos das linhas de alimentação do produto e por elevar o pH a 12 para iniciar a precipitação.

O hidróxido de magnésio também não será pesquisado, pois é somente utilizado em plantas piloto, com baixa vazão. Além disso, esse composto não é fornecido em concentração comercial: somente é comercializada em alta pureza (produtos farmacêuticos). Portanto, o estudo de eficiência será efetuado com os produtos sulfato de alumínio, PAC e cloreto férrico, conforme Figura 8.

Figura 8: Representação esquemática do processo de remoção de fósforo que serão pesquisadas na ETE SJN.



Fonte: autor

5. METODOLOGIA

5.1 Caracterização da Pesquisa

Este trabalho tem intuito de encontrar a concentração mais adequada e o coagulante para realizar a remoção de fósforo na ETE SJN. Após a avaliação dos coagulantes será esboçado um projeto com os principais equipamentos e cálculos com os custos de implantação e operação da remoção de fósforo.

A classificação dessa pesquisa se enquadra como exploratória com natureza quantitativa, posto que após a obtenção dos dados será feita a avaliação sobre as informações levantadas. Pesquisas exploratórias tem como finalidade a proximidade com o assunto analisado, normalmente utilizando estudo de caso com amostragens quantitativas (GIL, 2008).

5.2 Coleta de dados

As coletas de dados foram efetuadas em duas etapas:

- a) Mapeamento da disponibilidade de coagulantes na grande Porto Alegre – esta pesquisa foi efetuada em *sites* de busca na *internet*;
- b) Avaliação da eficiência de remoção do fósforo dos coagulantes: sulfato de alumínio; PAC e cloreto férrico – esta avaliação foi efetuada em duas etapas: a primeira foi utilizada varias concentrações dos três coagulantes indicada pelo fornecedor tendo como base a proximidade de custos; e a segunda foi verificação as concentrações em que obtiveram melhor desempenho, confirmariam a eficiência em triplicata.

5.3 Análise de Dados

As análises foram feitas a partir dos resultados obtidos do mapeamento de disponibilidade e eficiência de remoção do fósforo, conforme descrito abaixo:

A análise do mapeamento da disponibilidade de coagulantes na grande Porto Alegre verificou que há logística para inserir no processo a remoção de fósforo na ETE SJN.

A eficiência de remoção do fósforo foi efetuada por testes, em escala de bancada, no agitador *jar-teste* utilizado os coagulantes sulfato de alumínio; PAC e

cloreto férrico. As análises de turbidez, pH, ferro total, alumínio total e fósforo total foram escolhidas para avaliar a remoção do fósforo, pois: a turbidez indica a quantidade de sólido no efluente; o pH, ferro total e alumínio total, devido a Resolução 355/2017 indicar limites para o lançamento do efluente; e o fósforo total para avaliar a eficácia da remoção. A avaliação dos dados obtidos pelos ensaios de turbidez, pH, ferro total, alumínio total e fósforo total seguiram os seguintes critérios:

- a) para análise de fósforo total os melhores resultados em termos de remoção;
- b) a análise da turbidez foi avaliada tendo como critério menor valor;
- c) as análises de pH, alumínio total e ferro total serão avaliadas segundo a Resolução CONSEMA 355/2017 que indica de os valores máximos permitidos para efluentes são: pH - entre 6,0 e 9,0; alumínio total menor que 10 mg.L^{-1} e ferro total inferior a 10 mg.L^{-1} . O critério de avaliação foi que o efluente esteja de acordo como a Resolução.

As análises de alumínio total e ferro total foram avaliados para que o processo de remoção do fósforo não aumentasse a concentração destes cátions metálicos no efluente da ETE.

Após a escolha da concentração, coagulante e cálculos de volume de coagulante utilizado e volume de lodo gerado em um mês foi proposto um esboço de proposta de alteração para incluir no processo da ETE para remoção de fósforo. A proposta de alteração apresenta os principais equipamentos, tanques e tubulações para a adequação que devem ser acrescentados ao processo.

De posse do esboço da proposta de alteração, foram calculados os custos de implantação e de operação da remoção de fósforo. Os custos de implantação abarcam os equipamentos, tanques, tubulações e mão-de-obra para a adequação. Os custos de operação incluem o volume de coagulante e disposição de lodo desaguado durante um mês de operação.

5.4 Método

5.4.1 Mapeamento da disponibilidade dos Coagulantes

A disponibilidade de coagulantes foi mapeada através de uma pesquisa, em sites de busca na *internet*, *Google*, dos fabricantes e representantes que atuam na

grande Porto Alegre. O critério elencado foi a disponibilidade de entrega do coagulante em Porto Alegre.

5.4.2 Eficiência de Remoção do Fósforo

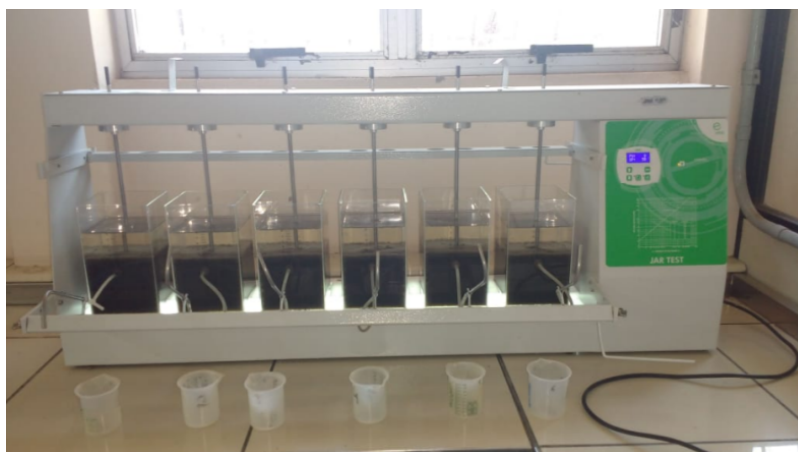
A avaliação da eficiência de remoção do fósforo com os coagulantes: sulfato de alumínio; PAC e cloreto férrico foram efetuados, em testes em escala de bancada, no agitador *jar-teste*, marca Nova Etica, modelo HX218LDB 06 provas – 220V, conforme *Figura 9*. Os teste em *jar-test* foram realizadas três etapas: coagulação, floculação e sedimentação, a descrição do teste consiste em:

a) **Coagulação**: 2 L a amostra do efluente do tanque de aeração com o coagulante foi agitada vigorosamente durante 1,5 minutos com a rotação de 120 RPM;

b) terminada a etapa de coagulação começa a etapa de **floculação**. Esta etapa consistiu em agitar a amostra durante 3 minutos com a rotação de 50 RPM; e

c) após a floculação, a agitação foi interrompida para que o lodo gerado sedimentasse, o tempo de **sedimentação** foi de 40 minutos.

Figura 9: Aparelho de Jar-teste



O primeiro teste foi efetuado com os três coagulantes, em diferentes concentrações. Após foi efetuado um segundo teste com as duas concentrações de coagulante que apresentaram a melhor eficiência. O segundo teste foi efetuado em triplicata para comprovar a eficiência das concentrações na remoção de fósforo total.

5.4.3 Análise Laboratorial

Os parâmetros analisados foram, tanto antes como depois do teste: pH,

turbidez, alumínio total, ferro total e fósforo total. Também foi efetuado o teste padrão que consiste em colocar no *jar-teste* uma amostra sem adição de coagulantes para comparação na reação de remoção de fósforo.

5.4.3.1 Análise de pH

A análise de pH foi efetuada em um pHmêtro da marca Thermo Scientific, modelo Orion Star A211, conforme Figura 10, calibrado em 07.08.2019 com validade de 6 meses, seguiu o procedimento da NBR 7353/2014.

A análise consiste em:

a) após o procedimento de ligar o aparelho e verificar as condições de análises utilizando dois padrões de referência com pH de 4,01 e 6,86. O resultado esperado deve estar nas faixas de 3,92 - 4,10 e 6,77 – 6,95, respectivamente; e

b) mergulhar o eletrodo em mais ou menos 50mL de amostra e pressionar analisar, após estabilizado, anotar o resultado.

Figura 10: Aparelho de medição de pH - pHmetro



5.4.3.2 Análise de Turbidez

A análise de turbidez foi efetuada no Turbidimêtro da marca Hach, modelo 2100P, conforme Figura 11 calibrado em 06.09.2019 com validade de 6 meses, seguiu o procedimento do *Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd – 2017/método 2130 B.

A análise consiste em:

a) após o procedimento de ligar o aparelho e verificar as condições de análises utilizando dois padrões de referência com turbidez 4 UNT e 40 UNT. O

resultado esperado deve estar nas faixas de 3,8 – 4,2 e 39 – 41, respectivamente; e

b) colocar na cubeta aproximadamente 10 mL de amostra e inserir a cubeta no aparelho e pressionar analisar, após estabilizado, anotar o resultado.

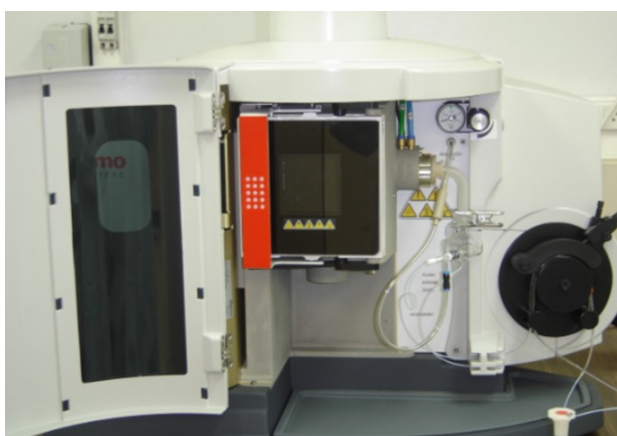
Figura 11: Aparelho para medição de turbidez - Turbidímetro.



5.4.3.3 Análise de Alumínio total, Ferro total e Fósforo total

As análises de alumínio total, ferro total e fósforo total foram efetuadas no equipamento ICP OES (*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*) da Marca Thermo Scientific, modelo iCAP6300Duo, conforme Figura 12. A análise segue a norma USEPA – Method 6010D – Rev. 5 – July, 2018.

Figura 12: Aparelho das análises de fósforo total, ferro total e alumínio total - Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES)



A análise no ICP OES consiste, basicamente, em:

a) coletar a amostra em frasco de 200 mL com preservante ácido nítrico (HNO_3)

a 0,5 %);

b) digerir o volume de 45 mL de amostra com a adição de 5 mL de HNO₃ P.A. em um digestor de microondas, durante 1h, conforme a norma USEPA - EPA 3015^a – Rev. 1 – Feb, 2007;

c) após a digestão a amostra é colocada no mostrador automático ASX 520 e analisadas no ICP OES; e

d) o resultado é gerado em mg do elemento por litro de amostra.

A escolha de análise por ICP OES foi pela disponibilidade do aparelho e por este ensaio ser reconhecido pela Rede Metrológica - RS na IEC ISO 17.025:2017. Os Limites de detecção para os analitos fosforo total, alumínio total e ferro total são 0,011 mg.L⁻¹, 0,015 mg.L⁻¹ e 0,023 mg.L⁻¹, respectivamente.

5.4.4 Esboço da Adaptação do Processo de Remoção de Fósforo

O esboço do projeto foi elaborado no aplicativo da Microsoft, *Paint*. O esboço não apresenta escala, pois caso aprovado pelo DMAE, este será encaminhado para a área de projetos. A área de projetos fará as devidas plantas que são: baixa, estrutural e hidráulica.

5.4.5 Análise de Custos

A análise de custo foi efetuada tendo como base o esboço da proposta de adaptação que discrimina as obras e equipamentos necessários para a adequação do processo. Os valores de materiais, equipamentos e mão de obra foram extraídos do sistema de valores pagos pelo DMAE na contratação/compra, via licitação.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. DISPONIBILIDADE COMERCIAL DE COAGULANTES

Para a verificação de disponibilidade dos coagulantes na área de Porto Alegre foi efetuada pesquisa na *Internet*, na plataforma de pesquisa *Google*. As palavras utilizadas na pesquisa foram “empresas de produtos químicos saneamento fornecedoras em Porto Alegre”. Como resultado foram encontradas quatro empresas, descritas abaixo:

1) Empresa PROJESAN – Saneamento Ambiental - Rua Vidal Flávio Dias, 635 - Belchior Baixo - Gaspar/SC – fornece para Porto Alegre os produtos: cloreto férrico, PAC, sulfato de alumínio e hidróxido de cálcio;

2) Empresa AMBIENTALY – Unidade Guaíba (RS) - Rua Itajaí, 10 – Bairro São Francisco – Guaíba/RS – fornece para Porto Alegre os produtos: cloreto férrico, PAC, sulfato de alumínio e hidróxido de cálcio;

3) Empresa AVANEX – Indústria e Comércio Ltda - Rodovia SC 114, s/n, Km 203 - Bairro Lageadinho – Palmeira/SC - fornece para Porto Alegre os produtos: cloreto férrico, PAC, sulfato de alumínio e hidróxido de cálcio; e

4) FAXON Química - RS 239, 8600 – Bairro Quatro Colônias - Campo Bom/RS - fornece para Porto Alegre os produtos: PAC, sulfato de alumínio e hidróxido de cálcio.

Foi contatada a empresa AMBIENTALY e solicitado amostrar de cloreto férrico, PAC e sulfato de alumínio para efetuar os testes. Foram escolhido estes coagulantes pelos motivos apresentados no item 4.6, Problematização.

6.2. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE COAGULANTES

Os testes de remoção de fósforo para escolha do coagulante, com melhor desempenho, foi realizado no dia 11 de setembro de 2019. Os coagulantes utilizados foram:

- a) Cloreto férrico (nome comercial Cloreto Férrico Salfer C) com 38 % de FeCl_3 p/p, acidez livre (em HCl) de no máximo 1 %, densidade (a 20°C) de no mínimo 1,380 g/cm³ e concentração mínima de Fe^{3+} de 19 %;

- b) Poli Cloreto de Alumínio (nome comercial Policloreto de Alumínio (PAC 18) Pac Floc 180) com teor de Al_2O_3 (mínimo 17,50 – máximo 18,50 %), densidade (a 20°C) de no máximo $1,400 \text{ g.cm}^{-3}$ e pH máximo 2,0;
- a) Sulfato de alumínio (nome comercial Sulfato de Alumínio Férrico Líquido Bausan 70) com no mínimo 21,8 % de sulfato de alumínio anidro e no máximo 3,75% de sulfato férrico anidro e densidade (a 20°C) de no mínimo $1,335 \text{ g.cm}^{-3}$.

Os testes com cloreto férrico foram efetuados em cinco concentrações: 20 mg.L^{-1} , 30 mg.L^{-1} , 40 mg.L^{-1} , 50 mg.L^{-1} e 60 mg.L^{-1} . Para o PAC, em três concentrações 30 mg.L^{-1} , 40 mg.L^{-1} e 50 mg.L^{-1} . Para o sulfato de alumínio, em três concentrações: 60 mg.L^{-1} , 70 mg.L^{-1} e 80 mg.L^{-1} . Foram obtidos os seguintes resultados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados das análises de Turbidez, pH, Ferro total, Alumínio total e Fósforo total.

Coagulante	Concentração (mg.L^{-1})	Turbidez (NTU)	pH	Ferro total (mgFe.L^{-1})	Alumínio total (mgAl.L^{-1})	Fósforo total (mgP.L^{-1})
Afluente		2,63	7,20	9,661	9,149	8,037
Efluente sem adição de coagulante		4,03	7,06	0,306	0,052	2,288
FeCl_3	20	4,25	7,04	0,391	0,068	0,560
FeCl_3	30	3,89	7,05	0,506	0,061	0,517
FeCl_3	40	2,14	6,91	0,534	0,034	0,373
FeCl_3	50	2,06	6,90	0,554	0,040	0,362
FeCl_3	60	2,66	6,91	0,533	0,046	0,280
PAC	30	3,62	7,08	0,185	0,135	2,094
PAC	40	3,72	7,06	0,174	0,123	1,931
PAC	50	2,67	7,02	0,152	0,112	1,726
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	60	4,06	7,02	0,199	0,185	1,962
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	70	4,31	6,99	0,207	0,210	1,884
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	80	4,58	7,01	0,196	0,216	1,796

Com os resultados dos testes dos coagulantes, podemos calcular a remoção de fósforo e o aumento desta remoção com o uso dos coagulantes, conforme Tabela 4.

Tabela 4: Remoção do fósforo total (%) em relação à concentração no afluente da ETE e o aumento da remoção com o uso de coagulantes em relação à remoção de fósforo sem a adição de coagulante.

Coagulante	Concentração (mg.L ⁻¹)	Fósforo total (mgP.L ⁻¹)	Remoção de fósforo total (%)	Aumento da Remoção de fósforo (%)
Afluente		8,037	-	-
Efluente sem adição de coagulante		2,288	71,5%	-
FeCl ₃	20	0,560	93,0%	75,5%
FeCl ₃	30	0,517	93,6%	77,4%
FeCl ₃	40	0,373	95,4%	83,7%
FeCl ₃	50	0,362	95,5%	84,2%
FeCl ₃	60	0,280	96,5%	87,8%
PAC	30	2,094	73,9%	8,5%
PAC	40	1,931	76,0%	15,6%
PAC	50	1,726	78,5%	24,6%
Al ₂ (SO ₄) ₃	60	1,962	75,6%	14,2%
Al ₂ (SO ₄) ₃	70	1,884	76,6%	17,7%
Al ₂ (SO ₄) ₃	80	1,796	77,7%	21,5%

Tendo em vista os resultados obtidos para os testes com os coagulantes: cloreto férrico, PAC e sulfato de alumínio, o coagulante que obteve melhor remoção de fósforo foi o cloreto férrico. As concentrações com melhor desempenho foram as de 40 e 50 mg.L⁻¹, pois além de altas remoções, também apresentaram baixa turbidez e pouca alteração no pH. Com relação à Tabela 3 foi observado que o coagulante cloreto férrico aumentou as concentrações de ferro, mas não ultrapassando o limite de lançamento em corpos hídricos, conforme requerido pela Resolução CONSEMA 355/2017 que é de no máximo de 10 mgFe.L⁻¹. Para confirmar a eficiência da remoção do coagulante cloreto de férrico foram efetuados testes no dia 09 de outubro, em triplicatas, nas concentrações 40 e 50 mg.L⁻¹. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados das análises de pH, Turbidez, ferro total, alumínio total e fósforo total para os testes nas concentrações 40 e 50 mg.L⁻¹ para cloreto férrico.

Coagulante	Concentração (mg.L ⁻¹)	Turbidez (NTU)	pH	Ferro total (mgFe.L ⁻¹)	Alumínio total (mgAl.L ⁻¹)	Fósforo total (mgP.L ⁻¹)
Afluente		11,5	7,25	3,115	1,581	6,298
Efluente sem adição de coagulante		10,3	7,14	0,535	0,309	1,700
FeCl ₃	40 (1)	2,15	6,83	0,550	0,111	0,302
FeCl ₃	40 (2)	2,13	6,76	0,517	0,059	0,299
FeCl ₃	40 (3)	2,11	6,77	0,459	0,042	0,247
FeCl ₃	50 (1)	2,05	6,69	0,510	0,069	0,175
FeCl ₃	50 (2)	2,00	6,71	0,517	0,109	0,275
FeCl ₃	50 (3)	2,03	6,70	0,445	0,030	0,162

Conforme Tabela 6, podemos constatar uma eficiência média de remoção utilizados a concentração de 40 mg.L⁻¹ de 95,5% e a 50 mg.L⁻¹ 96,8%, confirmando a remoção do primeiro teste para estas concentrações.

Tabela 6: Remoção do fosforo total (%) em relação à concentração no afluente da ETE com o uso de coagulantes.

Coagulante	Concentração (mg.L ⁻¹)	Fósforo total (mgP.L ⁻¹)	Remoção de fósforo total (%)	Remoção média de fósforo (%)
Afluente		6,298	-	-
Efluente sem adição de coagulante		1,700	73,0%	-
FeCl ₃	40	0,302	95,2%	
FeCl ₃	40	0,299	95,2%	95,5%
FeCl ₃	40	0,247	96,1%	
FeCl ₃	50	0,175	97,2%	
FeCl ₃	50	0,275	95,6%	96,8%
FeCl ₃	50	0,162	97,4%	

O volume calculado de coagulante cloreto férrico comercial, tendo com base o uso de 50 mg.L⁻¹, utilizado em um mês de operação da ETE SJN é de 208.970 L ou 208,97 m³ para uma vazão de 444 L.s⁻¹, vazão de projeto. Para a vazão média de

operação da ETE que é $303,8 \text{ L.s}^{-1}$ será utilizado $142,98 \text{ m}^3$ por mês de coagulante.

Não foi verificado, nos testes, um aumento de lodo gerado. No entanto, a literatura aponta um aumento de lodo de em média 20% (BOWKER, 1990). Para efeito de cálculo sobre o aumento de lodo, utilizou-se a maior concentração (50 mg.L^{-1}) de cloreto férrico e foi inferido que todo o FeCl_3 colocado reagiu com o fosfato. Portanto, conforme a estequiometria, temos $17,2 \text{ mgFe}^{3+}.\text{L}^{-1}$, pois a massa atômica do ferro é $55,8 \text{ g.mol}^{-1}$ e a massa molecular do FeCl_3 é $162,2 \text{ g.mol}^{-1}$.

A reação do Fe^{3+} com o fosfato (PO_4^{3-}) obtém o produto FePO_4 , cuja a massa molecular é $150,8 \text{ g.mol}^{-1}$. A massa formada de FePO_4 , utilizando 50 mg.L^{-1} de cloreto férrico, foi de $46,5 \text{ mg.L}^{-1}$.

O lodo da estação possui uma concentração de 5% de sólidos. A ETE foi projetada para tratar 444 L.s^{-1} ou $38.361,6 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$, mas atualmente trata em média $303,8 \text{ L.s}^{-1}$ ou $26.245,6 \text{ m}^3.\text{dia}^{-1}$. Com este volume, a ETE gerará $1.220,42 \text{ Kg.dia}^{-1}$ de FePO_4 ou $24.408,4 \text{ Kg.dia}^{-1}$ de lodo com 5% de sólido. Este lodo, após ser desaguado pela centrifuga, gera um total de lodo com 20% de sólido, de 6.100kg.dia^{-1} ou $183.000 \text{ kg.mês}^{-1}$.

7. PROPOSTA DE ADAPTAÇÃO DA ETE

A Figura 13 apresenta o esboço da planta baixa do tratamento de esgoto na ETE atualmente, indicando as correntes de esgoto bruto, lodo e lodo adensado. A Figura 14 apresenta os tanques, motor-bomba e tubulações necessárias para a adaptação da ETE tendo em vista a remoção de fósforo.

A proposta de adaptação, tendo como base a capacidade nominal de tratamento de esgoto de 444 L.s^{-1} , é composta por:

- a) construção de uma bacia de contenção com um volume nominal de 110 m^3 , composta por piso impermeável e paredes de concreto armado, com as dimensões de $12 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$ (conforme NBR 17525/2013);
- b) dois tanques cilíndricos de fibra com a capacidade de 100 m^3 cada nas dimensões de 4 m de diâmetro e 8 m de altura ;
- c) três motor-bomba resistentes a substâncias corrosivas, com capacidade nominal de $13,2 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ cada;
- d) sete válvulas esfera de PVC para 20 mm ;
- e) 17 barras de tubos em PVC de 20 mm ; e
- f) uma centrífuga para esgoto com vazão nominal de 500 L.s^{-1} , altura manométrica $14,5 \text{ MCA}$ (Metros de Coluna de Água) e com velocidade de operação de 595 RPM .

Os aspersores da solução comercial de cloreto férrico serão colocados no vertedouro do tanque de aeração para o tanque de decantação por tubos tipo flauta. Os tubos tipo flauta são compostos por uma barra de tubo com furos com a distância de 10 cm entre os furos. Para que o projeto seja executado deve ser analisado e ajustado pela área de projetos e execução de obras do DMAE. Não foi considerado o aumento de lodo gerado pela adição de coagulante, pois a ETE opera com 70% da sua capacidade e as tubulações são adequadas a este incremento de lodo.

Figura 13: Esboço da planta baixa da ETE na situação atual (fora de escala).

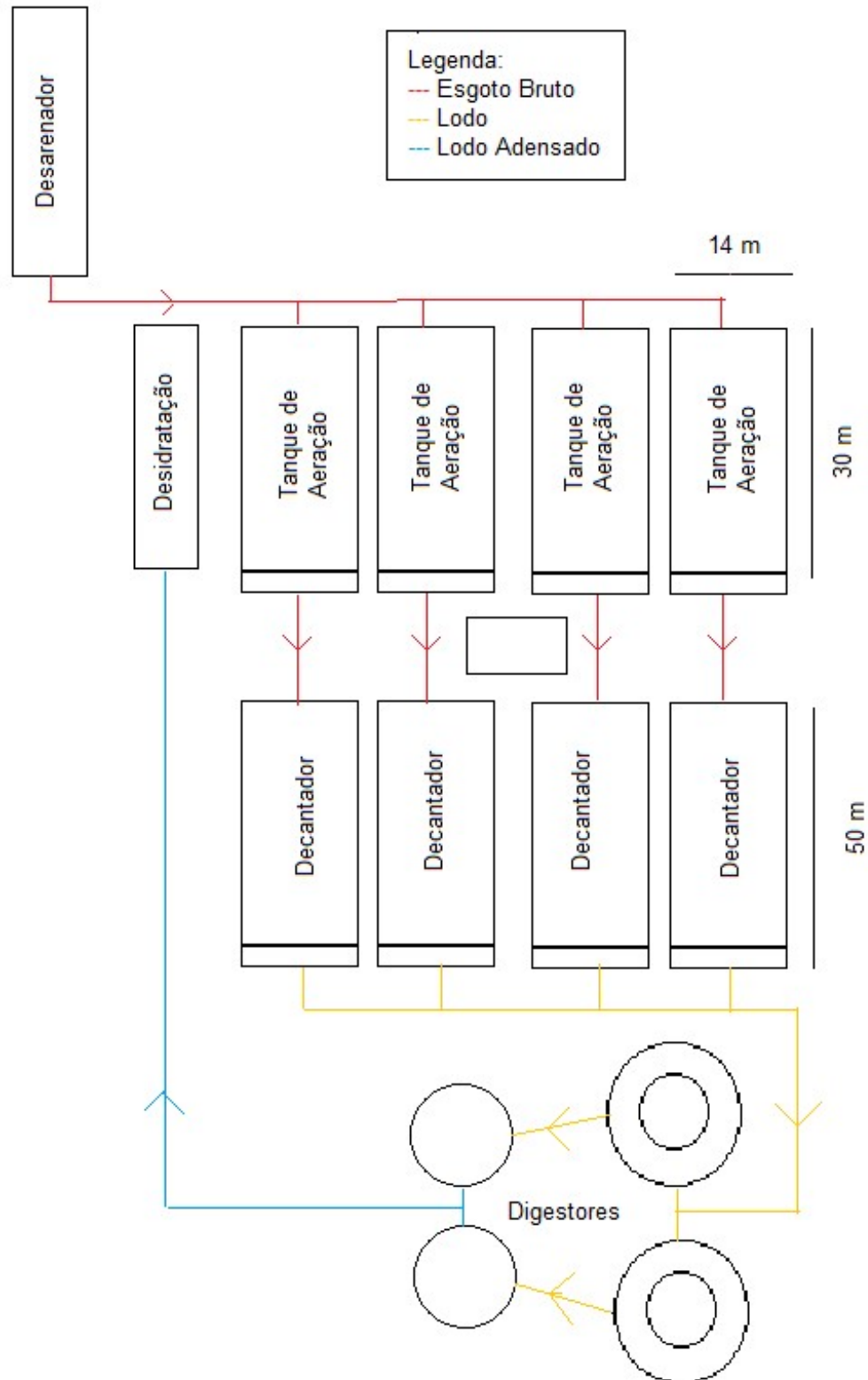
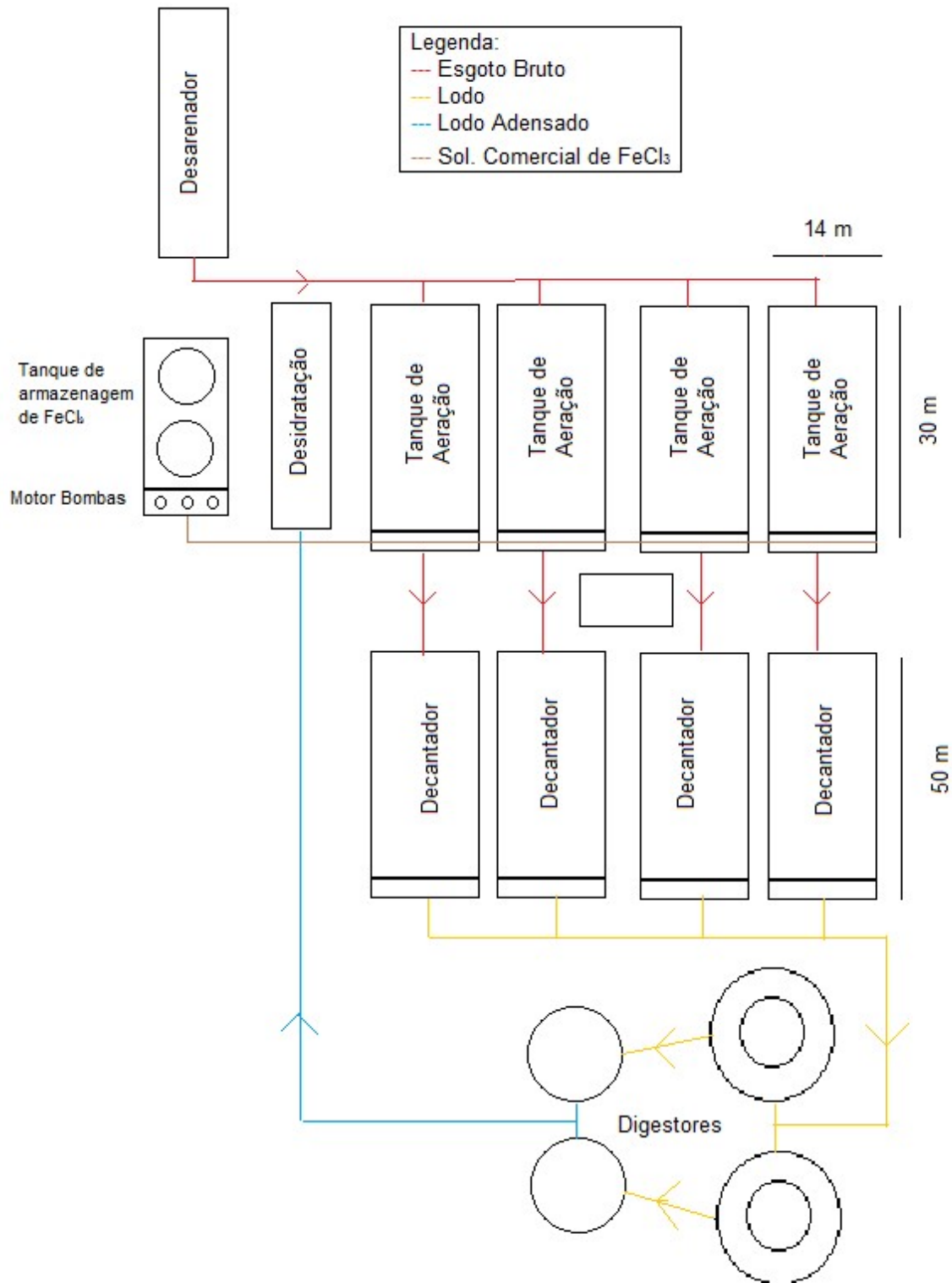


Figura 14: Esboço da planta baixa da ETE com as adaptações para a inclusão da remoção de fósforo (fora de escala).



8. ANÁLISE DE CUSTOS

Os valores totais dos custos para a compra dos equipamentos, construção e mão de obra do esboço de projeto de adequação foram estimados em R\$ 821.914,65. Os valores unitários e total são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7: Custos de materiais, equipamentos e mão de obra para a implantação do sistema de remoção de fósforo na ETE SJN.

Descrição/Material	N° de unidades	Valor unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Material para Construção da bacia de Contenção	1	31.685,04	31.685,04
Tanques cilíndricos de fibra (100 m ³)	2	85.000,00	170.000,00
Motor- bomba resistente a substâncias corrosivas	3	6.700,00	20.100,00
Válvulas esfera de PVC para 20 mm	7	12,42	86,94
Barras de tubos em PVC de 20 mm	17	2,51	42,67
Centrifuga para esgoto com vazão nominal de 500 l.s ⁻¹ (com instalação)	1	250.000,00	250.000,00
Mão de obra	—	—	350.000,00
Valor total estimado para instalação do sistema			821.914,65

Os custos de operação da remoção de fósforo na ETE são compostos conforme Tabela 8, tendo como base a vazão média de tratamento, 303,8 L.s⁻¹, perfazendo o total estimado de R\$ 58.837,55.

Tabela 8: Custos operacionais para a remoção de fósforo na ETE SJN em um mês de operação.

Descrição/Material	Nº de unidades	Valor unitário (R\$)	Valor Total (R\$)
Cloreto Férrico	197.318,3 Kg.mês ⁻¹	1,55kg ⁻¹	30.584,35
Disposição do Lodo*	37 caçambas	763,6 caçamba ⁻¹	28.253,20
Valor total estimado para operação			58.837,55

* A massa de lodo gerado em um mês de operação foi transformada em número de caçambas estacionárias. Cada caçamba suporta 5.000kg.

OBS.: O valor do cloreto férrico foi informado pela empresa Ambientus. O valor total da disposição do lodo por caçamba estacionária foi estimado considerando uma composição de valor de transporte até o transbordo do Departamento Municipal de Limpeza Urbana e transporte e disposição final na Companhia Riograndense de Valorização de Resíduos, unidade Minas do Leão – RS. Os custos com servidores não foram considerados.

O custo de implantação da remoção de fósforo na ETE SJN é de aproximadamente 830 mil. Este valor representa 1,36% da arrecadação anual para tratamento de esgoto na ETE SJN, tendo como base o valor da tarifa reconhecida pelo DMAE. Os autos de infração da FEPAM, por não atendimento de padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos, compreendem multa aplicada que pode variar de R\$ 5.000,00 (cinco mil reais) a R\$ 50.000.000,00 (cinquenta milhões de reais), conforme Art. 72º do Decreto Estadual nº 53202/2016. Portanto, o custo de implantação pode representar uma economia para o departamento, caso seja aplicada uma multa. O retorno financeiro não pode ser avaliado somente pela possibilidade de aplicação de multa, mas pelo principal motivo que é o ganho ambiental, tendo em vista a diminuição das quantidades de fósforo lançadas no corpo hídrico, que por sua vez, poderá diminuir a frequência de eutrofização do lago Guaíba.

9. CONCLUSÃO

O presente trabalho foi motivado pelos problemas causados pela não remoção de fósforo em ETEs. O principal problema causado pelo excesso de fósforo em corpos hídricos é a eutrofização. A eutrofização pode causar mortalidade da vida aquática e interrupção captação de água para tratamento.

Para a remoção de fósforo na ETE SJN foi efetuado testes de bancada tipo *jarrest* tendo com objetivo avaliar os coagulantes com melhor desempenho na remoção do fosforo. O coagulante com melhor eficiência, nas condições atuais da ETE, foi o cloreto férrico que apresentou uma remoção de aproximadamente 96%, sendo utilizada uma concentração de 50 mg.L⁻¹. Esta remoção atenta integralmente à resolução CONSEMA 355/2017 que coloca como parâmetro uma remoção de 75 %.

Quanto à formação de lodo, a ETE tem capacidade de processar sem alteração de estrutura em médio prazo, pois foi projetada para tratar 444 L.s⁻¹ e trata em média 303,8 L.s⁻¹. Para tal, apenas deverá ser adquirida uma centrífuga. O lodo desaguado com 20% de sólido gerará de 6.100 kg.dia⁻¹ ou 183.000 kg.mês⁻¹, massa esta calculada, pois os experimentos efetuados não permitem tal avaliação.

O esboço de projeto foi feito para que a análise de custo possa ser melhor estimada, pois antes da implantação, o projeto deve passar pela área de engenharia do departamento para adequações necessárias. O esboço do projeto apresenta equipamentos e tubulações que são básicas, tendo em vista, também, a localização dos equipamentos dentro da na ETE.

Quanto à análise de custo, esta foi uma estimativa de investimento inicial de aproximadamente 830 mil e o custo de operação de 59 mil por mês. Este investimento não terá retorno financeiro, salvo se o órgão fiscalizador, FEPAM, aplicar multas. O retorno será ambiental, pois a ETE diminuirá o lançamento do elemento fósforo no corpo hídrico, lago Guaíba, podendo diminuir a frequência de eutrofização do lago.

O trabalho mostrou-se de grande valia para o departamento, pois apresenta uma solução viável para o problema de remoção de fósforo na ETE SJN e possivelmente para outras ETEs. A viabilidade do projeto é apresentada pelo baixo investimento em infraestrutura e um baixo custo de operação do sistema.

As limitações do desenvolvimento do trabalho foram poucos testes e avaliação de geração de lodo efetuada por cálculo. Os testes foram efetuados em apenas dois dias e em períodos chuvosos. Isto diminui a carga de fósforo afluyente à ETE. Para uma correta avaliação seriam necessários testes semanais por pelo menos durante seis meses, em uma planta de escala piloto, para avaliar a concentração do coagulante utilizado na operação e o volume de lodo gerado.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Rodrigo da Rocha; GIROLDO, Danilo. Limnological characterisation and phytoplankton seasonal variation in a subtropical shallow lake (Guaiba Lake, Brazil): a long-term study. **Acta Limnologica Brasiliensia**, 2014, vol. 26, no. 4, p. 442-456;

ABALDE, Julio; CID, Angeles; FIDALGO, Pablo; TORRES, Enrique; HERRERO, Concepción. **Microalgas: cultivo y aplicaniones**. 210f. Monografia, Universidade da Coruña, Espanha, 1995;

BOWKER, Robert P. G.; STENSEL, H. David. Phosphorus removal from wastewater. **Pollution Technology Review**. Noyes Data Corporation, New Jersey. USA. 1990;

BRASIL. Resolução CONAMA 375/2006. 29 de Agosto de 2006;

BRASIL. Resolução CONAMA nº 430/2011. 13 de Maio de 2011;

BRASIL. Ministério das Cidades. **Processos de Tratamento de Esgotos: Guia do Profissional em Treinamento: nível 1**. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. 2008;

CASTRO, Lilliane Socorro de. **Direito fundamental de acesso a água potável e a dignidade da pessoa humana**. In: *Âmbito Jurídico*, Rio Grande, XVI, n. 117, out 2013. Disponível em: <http://www.ambito-juridico.com.br/site/?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=13202>. Acesso em maio 2019;

CHAPRA, Steven. **Surface Water-Quality Modeling**. Nova Iorque. ED. The McGraw-Hill Companies. 1997;

CHIES, Alessandro Canal. **Avaliação de Coagulantes a Base de Ferro na remoção de Fósforo Total no Tratamento de Esgoto**. Trabalho de conclusão do Curso de Química. UFRGS. 2016;

DABROWSKI, Andrzej. Adsorption—from theory to practice. **Advances in Colloid**

and Interface Science. v. 93. p. 135-224. 2001;

DE-BASHAN, Luz; BASHAN, Yoav. Recent advances in removing phosphorus from wastewater and its future use as fertilizer (1997–2003). **Water Research**. v. 38. p. 4222-4246. 2004;

FANGMEIER, Michele; GENNARI, Adriano; REISDÖRFER, Gustavo. Tratamento de fósforo em efluente final com o uso de filtro de carvão ativado, areia e brita. **Revista Destaque Acadêmico**. Vol. 7. N° 4. CETEC/UNIVATES. 2015;

FERREIRA, Ana Linda Tiago Soares. **Remoção Biológica Simultânea de Fósforo e Nitrogênio de Esgoto Sanitário em reatores Sequenciais em Bateladas**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil (Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). UFPE. 2014;

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOMES, Marco Antônio Ferreira; DE SOUZA, Manoel Dornelas; BOEIRA, Rita Carla; DE TOLEDO, Luiz Gonzaga. **Nutrientes Vegetais no Meio Ambiente: ciclos bioquímicos, fertilizantes e corretivos**. Segunda Edição. Embrapa Meio Ambiente. Jaguariúna. SP. 2008;

GUALBERTO, Fernanda Ferrari. **Otimização de Processo de Precipitação Química na Remoção de Fósforo de Esgoto Sanitário Mediante a Utilização de Sais de Ferro como Coagulante**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2009.

HALLS, Steve. **Planejamento e Gerenciamento de Lagos e Reservatório. Qualidade da água: o impacto da eutrofização**. UNEP- IETC/ILE. 2011;

HENRIQUE, Israel Nunes; DE SOUSA, José Tavares, DE CEBALLOS, Beatriz Susana Ovruski, BRASIL, Danielle Patrício. Remoção biológica de fósforo em reatores em bateladas sequenciais com diferentes tempos de retenção de sólidos.

Eng. Sanit .Ambient. v.15. n.2. abr/jun. 2010;

ISTVÁNOVICS, Vera. **Eutrophication of Lakes and Reservoirs.** Encyclopedia of Inland Waters. P. 316 – 324. 2009;

Instituto Trata Brasil. 2018. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/esgoto>. Acesso em: 22/07/2018;

JULIANO, Viviane Berwanger. **Remoção dos Compostos 2-Metilisoborneol e Geosmina da Água de Abastecimento por Carvão Ativado Granular e Ação Microbiana.** Tese de Doutorado. IPH. UFRGS. 2010;

MARONEZE, Mariana Manzoni; ZEPKA, Leila Queiroz; VIEIRA, Juliana Guerra; QUEIROZ, Maria Isabel; JACOB-LOPES, Eduardo. A tecnologia de remoção de fósforo: gerenciamento do elemento em resíduos industriais. **Rev. Ambient. Água.** vol. 9. n. 3. Taubaté. Jul./ Sep. 2014;

MARTIN, Héctor Garcia; IVANOVA, Natalia; KUNIN, Victor; WARNECKE, Falk; BARRY, Kerrie; MCHARDY, Alice; YEATES, Christine; HE, Shaomei; SALAMOV, Asaf; SZETO, Ernest; DALIN, Eileen; PUTNAM, Nik; SHAPIRO, Harris; PANGILINAN, Jasmyn; RIGOUTSOS, Isidore; KYRPIDES, Nikos; BLACKALL, Linda Louse; MCMAHON, Katherine; HUGENHOLTZ, Philip. Metagenomic analysis of two enhanced biological phosphorus removal (EBPR) sludge communities. **Nat. Biotechnol.** V.24 (10). P. 1263–1269. 2006;

MAXIMIANO, Antônio. **Introdução à administração.** 2. ed. São Paulo: Atlas, 1986;

MONTOVANI, Camila Pereira; POLETTI, Eliane Catapani. Modelagem matemática da concentração de fósforo: Uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos. **HOLOS Environment.** Vol. 13. N° 2. 2013;

MOLOSSI, Juliane, BRIÃO, Vandrê B., HEMKEMEIER, Marcelo. Pós-tratamento físico químico de efluentes de laticínio para remoção de fósforo. **Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal.** v. 11. n. 2. p. 124-141. jul./dez. 2014;

POMPÊO, Marcelo. **Monitoramento e Manejo de Macrófitas Aquáticas em Reservatórios Tropicais Brasileiros**. Instituto de Biociências – IB/USP. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2017;

RASÕES, Marília Alexandra Almeida. **Estudo sobre a Precipitação Química de Fósforo como forma de Remediação do Estado Trófico da Lagoa das Furnas, S. Miguel – Açores**. Dissertação Mestre em Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa. 2008;

RIO GRANDE DO SUL. **Resolução CONSEMA 355/2017**. 13 de julho de 2017;

RITTMANN, Bruce Edward; MAYER, Brooke; WESTERHOFF, Paul; EDWARDS, Mark. Capturing the lost phosphorus. **Chemosphere**, v. 84, p. 846-853, 2011.

SPERLING, Marcos Von. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. 2005;

Manual do Saneamento Básico. Instituto Trata Brasil. 2012. Disponível em: <http://www.tratabrasil.org.br/datafiles/uploads/estudos/pesquisa16/manual-imprensa.pdf>. Acesso em julho 2019;

VIEIRA, Juliana Guerra; MANETTI, Adriana Gonçalves da Silva; JACOB-LOPES, Eduardo; QUEIROZ, Maria Isabel Uptake of phosphorus from dairy wastewater by heterotrophic cultures of cyanobacteria. **Desalination and Water Treatment**. v. 40, p. 1-3. 2012;

TCHOBANOGLIOUS, George; STENSEL, David; TSUCHIHASHI, Ryujiro; BURTON, Franklin; ABU-ORF, Mohammad; BOWDEN, Gregory; PFRANG, William. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos / Metcalf & Eddy**. McGraw Hill Brasil. 5ª ed. 2016;

<<http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/>>. Acesso em agosto 2019.