

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Luiz Carlos Pierozan Garcia

**Avaliação de sistemas de lodo ativado aplicados como tratamento de esgoto
sanitário em condomínios residenciais**

Florianópolis

2023

Luiz Carlos Pierozan Garcia

**Avaliação de sistemas de lodo ativado aplicados como tratamento de esgoto
sanitário em condomínios residenciais**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador: Prof. Nelson Libardi Junior, Dr.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Garcia, Luiz Carlos Pierozan

Avaliação de sistemas de lodo ativado aplicados como
tratamento de esgoto sanitário em condomínios residenciais
/ Luiz Carlos Pierozan Garcia ; orientador, Nelson Libardi
Junior, 2023.

115 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental,
Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

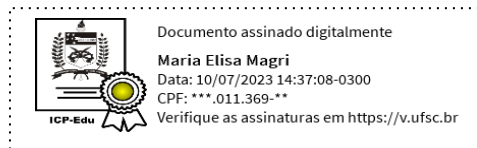
1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. estação de
tratamento de esgoto. 3. lodos ativados. 4. controle
operacional. I. Junior, Nelson Libardi. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental. III. Título.

Luiz Carlos Pierozan Garcia

**Avaliação de sistemas de lodo ativado aplicados como tratamento de esgoto
sanitário em condomínios residenciais**

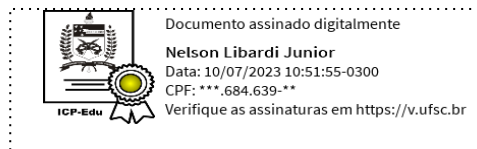
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 04 de julho de 2023.

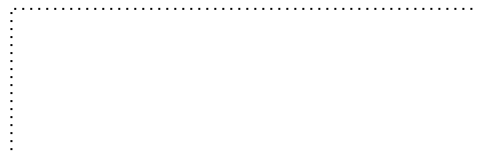


Profa. Maria Elisa Magri, Dra.
Coordenadora do Curso

Banca examinadora



Prof. Nelson Libardi Junior, Dr
Orientador



Prof. Pablo Heleno Sezerino, Dr.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina



Enga. Amanda Silva Nunes, Me.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2023.

Aos meus amados pais, que me deram a dádiva inestimável de existir.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram de forma significativa para a realização deste trabalho. Essa conquista, a formação no curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, não é apenas minha. Dedico essa conquista à minha família, que sempre me apoiou em todas as etapas da minha vida.

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer aos meus pais, Luciana Izabel Pierozan e Luiz Nilton Garcia, pela educação, dedicação e carinho que me deram até aqui. Especialmente ao meu pai, por seu constante apoio, incentivo e orientação em minhas decisões.

Quero expressar minha gratidão à minha amada namorada, Greyce Vera Albino, que esteve ao meu lado desde o início da minha graduação. Seu apoio incondicional, ânimo e compreensão foram essenciais para superar os desafios e celebrar as conquistas. Obrigado por todo o amor e dedicação diários.

À Giselle Gonçalves Virissimo Garcia, minha madrasta e segunda mãe, agradeço pelas conversas, conselhos, carinho e dedicação à família. Sua presença e apoio foram fundamentais para minha jornada.

À minha querida irmãzinha Luiza, por compartilhar comigo a sua alegria contagiante.

Ao meu tio Carlos Roberto Pierozan, agradeço por ter sido fundamental na minha trajetória educacional. Obrigado por ter aberto caminhos para a minha formação.

Também quero expressar minha gratidão ao meu amigo Carlos Eduardo Valentin da Costa, que esteve sempre comigo ao longo desses anos. Juntos, compartilhamos sonhos, desafios e celebrações. O futuro nos reserva grandes conquistas, e brindaremos a elas.

Ao Bruno Rech, amigo que a graduação me proporcionou, foi um prazer imenso conhecê-lo durante esse percurso acadêmico. Sua amizade tornou essa jornada mais leve e significativa.

Agradeço ao meu orientador, Nelson Libardi Junior, pela orientação, paciência e valiosas sugestões durante o desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência e conhecimento foram essenciais para o meu aprendizado e crescimento acadêmico.

Também expresso minha gratidão aos membros da banca examinadora, Pablo Heleno Sezerino e Amanda Silva Nunes, por dedicarem seu tempo e expertise na avaliação deste trabalho.

Por fim, expresso meus agradecimento à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelos excelentes docentes que me proporcionaram conhecimentos sólidos e enriquecedores no campo da Engenharia Sanitária e Ambiental. A todos vocês, meu profundo agradecimento por desempenharem um papel crucial em minha jornada acadêmica. Sou imensamente grato por todo o apoio, encorajamento e contribuições valiosas.

RESUMO

A disposição inadequada e o tratamento inadequado do esgoto sanitário implicam em perda de qualidade de vida, problemas de saúde e dificuldade em desfrutar de um espaço comum de qualidade para a população local. Este trabalho consiste em estudar duas estações de tratamento de esgoto do tipo lodos ativados em dois condomínios localizados no município de Florianópolis para tratar esgoto doméstico. O objetivo é avaliar o controle operacional, estrutura, biomassa e eficiência na remoção de parâmetros como demanda bioquímica de oxigênio, fósforo total e nitrogênio amoniacal. Foram utilizados dados secundários da operação das estações de tratamento de esgoto, bem como dados primários obtidos em análises laboratoriais, incluindo séries de sólidos suspensos no tanque de aeração, respirometria e microscopia do lodo ativado. Observou-se que as maiores concentrações de sólidos suspensos voláteis obtidas nos reatores para ETE 1 e ETE 2, 525 mg/L e 544 mg/L, respectivamente, estão abaixo dos valores recomendados na literatura e nos critérios de projeto. A respirometria indicou uma proporção elevada de microorganismos heterotróficos em relação aos autotróficos. A análise microscópica do lodo ativado revelou uma abundância de microorganismos do gênero *Epistylis* e baixa diversidade microbiana. Concluiu-se que a operação das estações de tratamento de esgoto do tipo lodos ativados depende dos equipamentos eletromecânicos instalados, que devem atender às necessidades operacionais e permitir a automação do sistema. Além disso, as análises realizadas desempenham um papel crucial ao fornecer informações relevantes para a tomada de decisões e contribuem significativamente para a operação eficiente do sistema.

Palavras-chave: estação de tratamento de esgoto; lodos ativados; controle operacional.

ABSTRACT

The incorrect and untreated discharge of sanitary sewage implies the local population's loss of quality of life, health problems, and difficulty in enjoying a quality common space. This study focuses on the investigation of two activated sludge type wastewater treatment plants in two residential complexes located in the municipality of Florianópolis, aimed at treating domestic wastewater. The objective is to evaluate operational control, structure, biomass, and efficiency in removing parameters such as biochemical oxygen demand, total phosphorus, and total ammonia nitrogen. Secondary operational data from the wastewater treatment plants were used, as well as primary data obtained from laboratory analyses, including assessment of the solids series in the aeration tank, respirometry, and microscopy of the activated sludge. It was observed that the solids concentration in the reactor is below the recommended values in the literature and the design criteria. Respirometry indicated a higher proportion of heterotrophic microorganisms compared to autotrophic ones. Microscopic analysis of the activated sludge revealed an abundance of *Epistylis* microorganisms and low microbial diversity. It can be concluded that the operation of activated sludge-based wastewater treatment plants depends on the installed electromechanical equipment, which must meet operational requirements and allow system automation. Furthermore, the conducted analyses play a crucial role in providing relevant information for decision-making and significantly contribute to the efficient operation of the system.

Keywords: wastewater treatment plant; activated sludge; operational control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Predominância relativa dos microrganismos	26
Figura 2 – Gradiente de concentração de oxigênio e DBO em um floco bacteriano.....	27
Figura 3 – Composição microbiana de um floco de lodo ativado	28
Figura 4 – Unidades de tratamento do sistema de lodos ativados	29
Figura 5 – (a) Sistema de pré-desnitrificação; e (b) Sistema de pós desnitrificação	33
Figura 6 – Variáveis no controle operacional de um sistema de tratamento de esgoto por lodos ativados.....	37
Figura 7 – a) Número de ETEs por categoria de município; e b) Número total de ETEs por tecnologia de tratamento.	43
Figura 8 – Fluxograma das atividades realizadas no presente trabalho.....	47
Figura 9 – Localização das estações de tratamento de esgoto de estudo ...	49
Figura 10 – (a) Ponto de coleta da ETE 1 e (b) Ponto de coleta da ETE 2 ..	50
Figura 11 – Esquema de montagem para análise respirométrica	53
Figura 12 – Vista geral da ETE 1	59
Figura 13 – Fluxograma da ETE 1	60
Figura 14 – (a) Tanque de entrada; e (b) Elevatória de esgoto bruto	62
Figura 15 – Corte de projeto: Tanque de entrada e elevatória de esgoto bruto	62
Figura 16 – (a) Tanque de retenção de sólidos; e (b) Tanque anóxico	64
Figura 17 – Corte de projeto: tanque de retenção de sólidos e tanque anóxico	64
Figura 18 – (a) Tanque de aeração com acesso ao registro da linha de recirculação do lodo; e (b) Tanque de aeração com acesso ao aerador/tubo de Venturi	66
Figura 19 – Corte de projeto: tanque de aeração	66
Figura 20 – (a) Decantador com acesso à calha coletora; e (b) Decantador com acesso à tubulação da linha de recirculação/descarte do lodo.....	67
Figura 21 – Corte de projeto: decantador	68
Figura 22 – (a) Tanque de desinfecção (contato); e (b) Tanque de depósito de lodo	69

Figura 23 – Corte de projeto: tanque de desinfecção e tanque para depósito de lodo	69
Figura 24 – Quadro de comandos da ETE 1	70
Figura 25 – Sólidos sedimentáveis da ETE 1 (4ª análise)	74
Figura 26 – (a) TCO endógena máxima da ETE 1; (b) TCO autotrófica máxima da ETE 1; e (c) TCO heterotrófica máxima da ETE 1	77
Figura 27 – (a) Ampliação de 40x, com observação do floco; (b) Ampliação de 40x no microscópio invertido, com observação do floco; (c) Ampliação de 40x, identificada a presença de microrganismos do gênero <i>Vorticella</i> ; (d) Ampliação de 100x, identificada a presença de microrganismos do gênero <i>Epistylis</i> ; (e) Ampliação de 40x, identificado a presença de microrganismos do gênero <i>Vorticella</i> ; e (f) Ampliação de 40x, identificado uma grande colônia de microrganismos do gênero <i>Epistylis</i>	79
Figura 28 – Vista geral da ETE 2	82
Figura 29 – Fluxograma da ETE 2	83
Figura 30 – Elevatória de esgoto bruto	84
Figura 31 – Corte da elevatória de esgoto bruto	85
Figura 32 – Medidor de vazão Thompson	86
Figura 33 – Corte do medidor Thompson	86
Figura 34 – (a) Tanque de aeração, acesso 1; e (b) tanque de aeração, acesso 2.	87
Figura 35 – Corte do tanque de aeração	87
Figura 36 – (a) Decantador, acesso 1; (b) decantador, acesso 2; e (c) registros da recirculação e retorno do lodo	89
Figura 37 – Corte do decantador secundário	90
Figura 38 – (a) Início do tanque de desinfecção com garrafa para adição de hipoclorito de cálcio; e (b) final do tanque de desinfecção	91
Figura 39 – Corte do tanque de desinfecção	91
Figura 40 – Tanque de acúmulo	92
Figura 41 – Corte do tanque de acúmulo	92
Figura 42 – Quadro de comandos da ETE 2	94
Figura 43 – Sólidos sedimentáveis da ETE 2 (4ª análise)	96
Figura 44 – (a) TCO endógena máxima da ETE 2; (b) TCO autotrófica máxima da ETE 2; e (c) TCO heterotrófica máxima da ETE 2	100

Figura 45 – (a) Ampliação de 40x, com observação do floco e colônia de *Epistylis*; (b) Colônia de *Epistylis* e micrometazoário; (c) Colônia de *Epistylis* e micrometazoário; (d) floco observado pelo microscópio invertido em aumento de 40x; (e) Nematóide observado em aumento de 100x; e (f) Colônia de *Epistylis* em aumento de 100x. 102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais características dos catabolismos oxidativo e fermentativo.....	23
Quadro 2 – Aceptores de elétron típicos das reações de oxidação no tratamento de águas residuais.	23
Quadro 3 – Principais microrganismo para o tratamento biológico dos esgotos	25
Quadro 4 – Datas das coletas e análises	51
Quadro 5 – Avaliação e medidas corretivas para operação das ETE 1 e ETE 2	58
Quadro 6 – Avaliação e medidas corretivas para correção da estrutura da ETE 1	72
Quadro 7 – Problemas observados nas análises da biomassa da ETE 1 e medidas corretivas	80
Quadro 8 – Avaliação e medidas corretivas para correção da estrutura da ETE 2	95
Quadro 9 – Problemas observados nas análises da biomassa da ETE 2 e medidas corretivas	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de análise, frequência das análises e concentrações limites para lançamento	46
Tabela 2 – Dados de projeto da ETE 1.....	59
Tabela 3 – Resultado das análises de sólidos no reator aeróbio da ETE 1..	72
Tabela 4 – IVL da ETE 1	74
Tabela 5 – Resultados do consumo de oxigênio (QO_2X), velocidade específica de respiração (QO_2), velocidade de consumo de oxigênio da biomassa autotrófica ($(QO_2X)_{Amáx}$) e heterotrófica ($(QO_2X)_{Hmáx}$) e concentração da biomassa autotrófica (X_A) e heterotrófica (X_H) da ETE 1	75
Tabela 6 – Concentrações e eficiências de remoção de DBO, fósforo e nitrogênio amoniacal	80
Tabela 7 – Dados de projeto da ETE 2.....	82
Tabela 8 – Resultado das análises de sólidos no reator aeróbio da ETE 2..	95
Tabela 9 – IVL da ETE 2	97
Tabela 10 – Resultados do consumo de oxigênio (QO_2X), velocidade específica de respiração (QO_2), velocidade de consumo de oxigênio da biomassa autotrófica ($(QO_2X)_{Amáx}$) e heterotrófica ($(QO_2X)_{Hmáx}$) e concentração da biomassa autotrófica (X_A) e heterotrófica (X_H) da ETE 2	98
Tabela 11 – Concentrações e eficiências de remoção de DBO, fósforo e nitrogênio amoniacal	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/M	Alimento/microrganismo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADP	Adenosina difosfato
ATP	Trifosfato de adenosina
ATU	<i>Allylthiourea</i>
Ca ₃ (PO ₄) ₂	Fosfato de cálcio
Ca ₅ (OH)(PO ₄) ₃	Apatita
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CV	Cavalo
d	Dia
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EEE	Estação Elevatória de Esgoto
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FA	Filtro anaeróbio
FATMA	Fundação do Meio Ambiente - Atual IMA
FDbI	Fator de diluição para <i>Vibrio fisheri</i>
FDD	Fator de diluição para <i>Daphnia magna</i>
g	Grama
H ₂ O	Água
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio
IMA	Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina
IVL	Índice Volumétrico de Lodo
KLA	Taxa de Transferência de Oxigênio
L	Litro
LABEFLU	Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos
m	Metro
m ³	Metro cúbico
mg	Miligrama
mL	Mililitro
MLE	Ludzack-Ettinger modificado
N ₂	Nitrogênio gasoso
NBR	Norma técnica brasileira
NH ₄ Cl	Cloreto de Amônio
NH ₄ MgPO ₄	Estruvita
NO ₃ ⁻	Nitrato

O ₂	Oxigênio
OD	Oxigênio Dissolvido
P	Fósforo
PAO	Polyphosphate Accumulating Organisms (organismos poli-P).
pH	Potencial hidrogeniônico
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
PROSAB	Programa de Pesquisas em Saneamento Básico
Q	Vazão
Q _b	Vazão da bomba
Q _{ex}	Vazão de retirada de lodo excedente
QO ₂	Velocidade específica de respiração
Q _r	Vazão de recirculação de lodo
RBF	Remoção Biológica de Fósforo
RBN	Remoção Biológica de Nitrogênio
S ₀	Concentração do substrato afluente
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento
SO ₄ ²⁻	Sulfato
SS	Sólidos Suspensos
SSed	Sólidos Sedimentáveis
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSTA	Sólidos Suspensos no Tanque de Aeração
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
SSVTA	Sólidos Suspensos Voláteis no Tanque de Aeração
ST	Sólidos Totais
SVT	Sólidos Voláteis Totais
TCO	Taxa de Consumo de Oxigênio
TS	Tanque séptico
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
V	Volume / Volts
X	Concentração da biomassa no reator aeróbio
X _A	Biomassa ativa autotrófica
X _H	Biomassa ativa heterotrófica
Y _A	Taxa de conversão autotrófica
Y _H	Taxa de conversão heterotrófica
θ _c	Idade do lodo
μ _{A máx}	Taxa de crescimento autotrófica
μ _{H máx}	Taxa de crescimento heterotrófico
μm	Micrômetro
(QO ₂ X) _A	Respiração autótrofa

$(QO_2X)_H$	Respiração heterotrófa
$(QO_2X)_{A \text{ máx}}$	Velocidade máxima de consumo de oxigênio da biomassa autotrófica
$(QO_2X)_{H \text{ máx}}$	Velocidade máxima de consumo de oxigênio da biomassa heterotrófica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	19
2.1	OBJETIVO GERAL	19
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1	DEMANDAS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	20
3.2	PRINCÍPIOS DO TRATAMENTO BIOLÓGICO	21
3.2.1	Princípios da microbiologia do tratamento de esgotos	21
3.2.2	Ecologia do tratamento de esgotos	24
3.2.2.1	<i>Tipos de crescimento e sustentação da biomassa</i>	26
3.3	O PROCESSO DE LODOS ATIVADOS	29
3.3.1	Variantes do processo de lodos ativados	31
3.3.1.1	<i>Lodos ativados convencional de fluxo contínuo</i>	31
3.3.2	Remoção biológica de nutrientes	32
3.4	CONTROLE OPERACIONAL DO SISTEMA DE LODOS ATIVADOS.....	35
3.4.1	Controle do oxigênio dissolvido	37
3.4.2	Controle de sólidos	38
3.4.2.1	<i>Vazão de recirculação de lodo (Q_r)</i>	38
3.4.2.2	<i>Vazão de lodo excedente (Q_{ex})</i>	39
3.5	APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE LODOS ATIVADOS PARA TRATAMENTO DE ESGOTO NO CONTEXTO BRASILEIRO.....	42
3.6	LEGISLAÇÕES APLICADA AO TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	45
4	METODOLOGIA	47
4.1	LOCAL DE ESTUDO	48
4.2	AMOSTRAGEM E PONTOS DE COLETA	49
4.3	SÉRIE DE SÓLIDOS	51
4.4	TESTE DE ÍNDICE VOLUMÉTRICO DE LODO (IVL)	51
4.5	TESTE DE RESPIROMETRIA.....	52
4.6	ANÁLISE MICROSCÓPICA DO LODO	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	AVALIAÇÃO OPERACIONAL DAS ETE 1 E ETE 2	56
5.2	AVALIAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO 1	58

5.2.1	Avaliação estrutural da ETE 1	58
5.2.1.1	<i>Tanque de entrada e elevatória de esgoto</i>	61
5.2.1.2	<i>Tanque de retenção de sólidos e tanque anóxico</i>	62
5.2.1.3	<i>Tanque de aeração</i>	64
5.2.1.4	<i>Decantador secundário</i>	66
5.2.1.5	<i>Tanque de desinfecção e tanque de depósito de lodo</i>	68
5.2.1.6	<i>Sistema eletromecânico</i>	69
5.2.2	Avaliação da biomassa aeróbia da ETE 1	72
5.2.2.1	<i>Levantamento de sólidos e IVL</i>	72
5.2.2.2	<i>Respirometria</i>	75
5.2.2.3	<i>Microscopia</i>	78
5.2.3	Avaliação da eficiência de tratamento da ETE 1	80
5.3	AVALIAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO 2	81
5.3.1	Avaliação estrutural da ETE 2	81
5.3.1.1	<i>Tanque pulmão</i>	83
5.3.1.2	<i>Medidor de vazão Thompson</i>	85
5.3.1.3	<i>Tanque de aeração</i>	86
5.3.1.4	<i>Decantador secundário</i>	87
5.3.1.5	<i>Tanque de contato</i>	90
5.3.1.6	<i>Tanque de acúmulo</i>	91
5.3.1.7	<i>Sistema eletromecânico</i>	93
5.3.2	Avaliação da biomassa da ETE 2	95
5.3.2.1	<i>Levantamento de sólidos e IVL</i>	95
5.3.2.2	<i>Respirometria</i>	97
5.3.2.3	<i>Microscopia</i>	101
5.3.3	Avaliação da eficiência de tratamento da ETE 2	103
6	CONCLUSÃO	105
	REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

O impacto do lançamento de esgotos domésticos não tratados em corpos d'água é motivo de grande preocupação para a sociedade. A legislação ambiental visa regular a seleção de locais de disposição de esgotos e o nível de tratamento exigido para garantir a mitigação dos impactos ambientais causados pela liberação desses efluentes nos corpos receptores. Resoluções estabelecem padrões para o lançamento de efluentes nos corpos receptores, como a Resolução CONAMA nº 357/2005 e a Resolução CONAMA nº 430/2011 em nível nacional, e a Lei Estadual de Santa Catarina nº 14.675/2009, juntamente com as Resoluções CONSEMA nº 181 e 182 de 2021 em âmbito estadual.

Devido a estas exigências, é necessário que seja implementado um sistema de tratamento de esgotos a fim de reduzir os efeitos deletérios do esgoto gerado e lançado no meio ambiente. O objetivo de uma estação de tratamento de esgotos é de proporcionar tratamento eficiente dos efluentes, satisfazendo requisitos específicos das legislações ambientais.

Os esgotos domésticos oriundos de atividades humanas são um dos fatores de principal causa de lançamento inadequado de esgotos não tratados diretamente nos corpos receptores, ocasionando sobrecarga no ecossistema e deterioração da qualidade da água. Além da matéria orgânica carbonácea, esses esgotos podem ter concentrações de compostos que servem de nutrientes para os microrganismos e macrorganismos, ocasionando assim a eutrofização dos corpos d'água, que tem como consequência o acentuado crescimento de algas, redução dos teores de oxigênio dissolvido, comprometimento estético do meio, além de problemas de gosto, odor e potabilidade das águas, elevando os custos de tratamento (JORDÃO; PESSÔA, 1995). Diante do exposto é imprescindível estações de tratamento de esgoto nas unidades habitacionais potencialmente poluidoras, além de pesquisa, monitoramento e otimização das atividades operacionais de estações de tratamento de águas residuárias.

Os sistemas centralizados de tratamento de efluentes de águas residuárias são amplamente utilizados em grandes cidades com adensamento populacional e possuem altos custos empregados na concepção do sistema, associados principalmente à coleta e transporte do efluente. Neste sentido, estações descentralizadas se sobressaem frente as centralizadas, uma vez que se reduz

drasticamente o capital aplicado à concepção do sistema, pois não há necessidade de implantação de sistema de coleta e transporte do efluente (PROSAB, 2009). Além disso, o risco associado à ETE descentralizada é menor, pois numa eventual falha do sistema de tratamento a alta carga de matéria orgânica carbonácea e nutrientes a serem lançadas também serão descentralizadas, contribuindo para a autodepuração do corpo hídrico.

Os processos biológicos que utilizam microrganismos para remoção da matéria orgânica e nutrientes em geral constituem uma alternativa mais econômica. Neste sentido, o sistema de lodos ativados é amplamente utilizado, em nível mundial, para o tratamento de despejos domésticos, principalmente em situações em que é necessária alta qualidade do efluente e reduzidos requisitos de área (VON SPERLING, 2016b).

O sistema de lodos ativados compreende o uso de biomassa microbiana altamente complexa e mantida em suspensão num meio aeróbio, que utiliza substrato presente no efluente para se desenvolver, para a oxidação bioquímica e remoção dos compostos orgânicos e inorgânicos. Portanto, a eficiência deste sistema está diretamente associada – entre outros fatores – à capacidade de formação de flocos com biomassa ativa (CHEN *et al.*, 2022).

Segundo von Sperling (2016b), as ETE do tipo lodos ativados enfrentam diversas problemáticas. Em primeiro lugar, há desafios relacionados à eficiência dessas ETE no cumprimento da legislação ambiental, principalmente no que diz respeito aos parâmetros de qualidade exigidos para o efluente tratado. Problemas estruturais também são frequentes, pois muitas vezes a construção e operação das ETE não seguem fielmente o projeto inicial, resultando em falhas de funcionamento e baixo desempenho. Além disso, é comum que não tenham sido projetadas adequadamente para remover nutrientes, como fósforo e nitrogênio, o que pode levar a altas concentrações desses elementos no efluente final, impactando negativamente o meio ambiente.

A biomassa que se desenvolve nos reatores aeróbios nem sempre possui concentração e características desejáveis. Essas questões destacam a importância de melhorias e adequações nos projetos, na manutenção, operação e monitoramento das ETE, para que possam garantir o cumprimento das normas ambientais e a preservação dos recursos hídricos.

Desta forma, este estudo consistiu em uma avaliação de duas estações de tratamento de esgoto do tipo lodos ativados, responsáveis pelo tratamento de esgoto doméstico proveniente de condomínios residenciais localizados no município de Florianópolis. A avaliação abrangeu a análise operacional, estrutural, da biomassa aeróbia e de eficiência do sistema de tratamento.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar duas ETE do tipo lodos ativados de dois condomínios residenciais situados no município de Florianópolis para tratar esgoto doméstico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar o controle operacional das ETE e possíveis alterações;
2. Avaliar a estrutura executada das ETE, comparando com seus projetos;
3. Avaliar as características da biomassa aeróbia através de ensaios laboratoriais;
4. Avaliar a eficiência das ETE acerca da remoção de matéria orgânica carbonácea e nutrientes.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 DEMANDAS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento – SNIS, no ano de 2020, em todo o país, foi registrado um índice de atendimento total de esgoto de 55,0% para os municípios que possuem fornecimento de água. Em relação ao índice de atendimento urbano de esgoto dos municípios com fornecimento de água, constatou-se que em 2020 o índice alcançou 63,2%.

Com relação ao estado de Santa Catarina, o índice de atendimento urbano por rede de esgoto varia entre 20% e 40%, enquanto na capital Florianópolis a abrangência da coleta de esgoto é de 67,9%. No entanto, é importante destacar que a coleta de esgoto por si só não garante o tratamento e a destinação adequados, que são requisitos estabelecidos pelo Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) para um atendimento adequado dos efluentes gerados. A Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, define claramente que a universalização do saneamento básico requer o tratamento e a disposição final adequados dos esgotos sanitários. Ainda de acordo com o SNIS, em 2020 o tratamento de esgoto em relação à coleta de esgoto nas regiões Centro-Oeste, Sul, Sudeste, Nordeste e Norte apresentam índices de 94,3%, 93,9%, 76,4%, 76,0% e 85,8%, respectivamente.

O provimento de esgotamento sanitário pode ser realizado por meio de soluções coletivas ou individuais, conhecidas como soluções alternativas. As soluções alternativas sem rede coletora de esgotos são utilizadas em situações em que os domicílios não estão conectados aos serviços públicos de coleta e/ou tratamento de esgotos, principalmente em comunidades isoladas. De acordo com Tonetti *et al* (2018), esse isolamento pode ser causado por diversos fatores, como a inviabilidade técnica, econômica e/ou política, bem como a distância em relação à sede do município, dificuldade de acesso, baixa densidade populacional, grande dispersão entre os domicílios ou situação de irregularidade fundiária. A fim de alcançar a universalização do tratamento de esgoto em Santa Catarina e, além, no Brasil, é necessário empregar outras formas alternativas além das soluções coletivas em rede utilizadas em áreas urbanas.

O lançamento de esgoto bruto ou inadequadamente tratado no meio ambiente causa grande preocupação na sociedade devido aos impactos ambientais e na saúde

pública. O esgoto contém diversos microrganismos, incluindo patógenos que podem afetar a saúde humana e sobrecarregar os serviços de saúde. Em 2023, foi evidenciada a importância da universalização do esgotamento sanitário em Santa Catarina, uma vez que, de acordo com dados divulgados, 114 dos 237 pontos de praia analisados no estado estavam impróprios para banho, o que representa 48,1% dos pontos analisados (FLORIANÓPOLIS, 2023a).

Os números mencionados são reflexos do grande aumento populacional no litoral catarinense durante as épocas de veraneio, bem como da falta de previsibilidade e infraestrutura para o tratamento do esgoto gerado por essa população flutuante. Por exemplo, durante o carnaval de 2023, a população do município de Florianópolis, que possui cerca de 500.000 habitantes (IBGE, 2021), triplicou, atingindo 1,5 milhão de pessoas na cidade (FLORIANÓPOLIS, 2023b). Como resultado, a vazão de esgoto gerada também aumentou.

Sendo assim, o controle ambiental, aliado à conscientização da população e à promulgação de legislações ambientais mais restritivas, tende a evitar danos irreparáveis e a melhorar a qualidade de vida das gerações atuais e futuras. Com esse objetivo, as estações de tratamento de esgoto visam fornecer um tratamento eficiente das águas residuais para atender aos requisitos legislativos ambientais específicos (KLAUS, 2012).

3.2 PRINCÍPIOS DO TRATAMENTO BIOLÓGICO

3.2.1 Princípios da microbiologia do tratamento de esgotos

O tratamento biológico de esgotos ocorre inteiramente por mecanismos biológicos. Estes processos biológicos reproduzem, de forma otimizada, os processos naturais que acontecem na natureza, como o que acontece com o esgoto após lançado num corpo hídrico. No corpo d'água a matéria orgânica é convertida em produtos mineralizados, que são menos agressivos ou até mesmo inertes ao meio ambiente. Este fenômeno é conhecido como autodepuração. A otimização destes processos se dá em condições controladas (controle de eficiência) e em taxas mais elevadas (reduzindo a área necessária) e é possibilitada devido a introdução de tecnologias ao tratamento (VON SPERLING, 2016b).

Dentre os principais microrganismos envolvidos no processo de tratamento de esgotos estão as bactérias, protozoários, fungos, algas e vermes. As bactérias assumem o protagonismo na estabilização da matéria orgânica. Para que os seres vivos possam desempenhar suas funções metabólicas necessitam basicamente de energia, carbono e nutrientes. Em termos de carbono, há fundamentalmente dois tipos de organismos: seres autótrofos (fonte de carbono no gás carbônico – CO_2) e seres heterótrofos (fonte de carbono na matéria orgânica). Em termos de fonte de energia, há dois tipos de organismos: seres fototróficos (fonte de energia na energia luminosa) e os seres quimiotróficos (fonte de energia das reações químicas) (VON SPERLING, 2016b).

Na maior parte dos processos de tratamento de esgotos, tal como para os lodos ativados, a luz não penetra significativamente no líquido, principalmente àquelas estações de tratamento de esgoto que ficam enterradas. Os organismos de real importância são, portanto, os quimioautotrófos – responsáveis pela nitrificação – e os quimioheterotróficos – responsáveis pela maior parte das reações que ocorrem no tratamento biológico (VON SPERLING, 2016b).

O metabolismo é um conjunto de processos químicos que ocorre nas células e podem ser divididos em catabolismo (ou desassimilação) e anabolismo (assimilação). Na primeira, ocorrem as reações de produção de energia, nas quais ocorre a degradação do substrato e na segunda ocorrem as reações que conduzem à formação de material celular com auxílio da energia liberada na desassimilação. De maneira simplificada, os organismos se reproduzem às custas da utilização da energia liberada na desassimilação e o crescimento líquido é resultando do balanço entre anabolismo (positivo) e catabolismo (negativo) (VON SPERLING, 2016b).

A redução da matéria orgânica oriunda dos esgotos ocorre através dos processos de catabolismo. Os dois tipos de catabolismo de interesse para o tratamento de esgotos domésticos são: catabolismo oxidativo (oxidação da matéria orgânica) e catabolismo fermentativo (fermentação da matéria orgânica). No catabolismo oxidativo ocorre a oxidação da matéria orgânica por um agente oxidante presente no meio líquido (oxigênio, nitrato ou sulfato), já no catabolismo fermentativo não há um oxidante, o processo ocorre devido ao rearranjo dos elétrons na molécula fermentada de tal forma que se formam no mínimo dois produtos e, por isso, geralmente há necessidade de várias fermentações sequenciais até que os produtos formados sejam estáveis, isto é, não mais suscetíveis à fermentação (VAN HAANDEL

E LETTINGA, 1994). As principais características do catabolismo oxidativo e fermentativo são mostradas no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais características dos catabolismos oxidativo e fermentativo

Característica	Catabolismo oxidativo (respiração)	Catabolismo fermentativo (fermentação)
Doador de elétrons	Matéria orgânica	Matéria orgânica oxidada
Aceptor de elétrons	Externo: composto inorgânico (oxigênio, nitrato ou sulfato)	Interno: matéria orgânica reduzida
Número de produtos finais resultantes da matéria orgânica	Um (CO ₂)	No mínimo dois (CO ₂ e CH ₄)
Forma do carbono no produto final	Carbono inorgânico oxidado (CO ₂)	Carbono inorgânico oxidado (CO ₂) + carbono orgânico reduzido (CH ₄)
Estado de oxidação do carbono no produto final	4+ (CO ₂)	4+ (CO ₂) 4- (CH ₄)

Fonte: Retirado e adaptado de von Sperling (2016b)

A respiração (catabolismo oxidativo) não se refere apenas aos processos que envolvem o consumo de oxigênio, na verdade implica na perda de um ou mais elétrons da substância oxidada. Tal substância pode ser matéria orgânica ou até mesmo composto inorgânicos reduzidos, como nitrato e sulfato, por exemplo, ambos são doadores de elétrons. Os doadores de elétrons transferem sua energia aos chamados aceptores de elétrons (compostos inorgânicos) através de reações bioquímicas complexas com o auxílio de enzimas. Desta forma, o acceptor de elétrons tem como resultado seu estado de oxidação reduzido (VON SPERLING, 2016b). O Quadro 2 exemplifica os principais aceptores de elétrons, em ordem decrescente de liberação de energia.

Quadro 2 – Aceptores de elétron típicos das reações de oxidação no tratamento de águas residuais.

Condições	Aceptor de elétron	Forma do acceptor após a reação	Processo
Aeróbias	Oxigênio (O ₂)	H ₂ O	Metabolismo aeróbio
Anóxicas	Nitrato (NO ₃ ⁻)	Nitrogênio gasoso (N ₂)	Redução de nitratos (desnitrificação)
Anaeróbias	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	Sulfeto (H ₂ S)	Redução de sulfatos (dessulfatação)
	Dióxido de carbono (CO ₂)	Metano (CH ₄)	Metanogênese

Fonte: Retirado de von Sperling (2016b)

Em um sistema com múltiplos aceptores de elétrons, a utilização ocorre inicialmente com aquele que gera a maior quantidade de energia. Portanto, o oxigênio dissolvido é a primeira escolha para as bactérias, e uma vez esgotado, o meio deixa de ser aeróbio. Caso haja disponibilidade de nitratos no sistema, os organismos capazes de utilizar nitrato em sua respiração começam a consumi-lo. Essa reação ocorre em um meio anóxico, ou seja, com ausência de oxigênio dissolvido e presença de nitrato. Quando o nitrato é consumido, o meio torna-se estritamente anaeróbio e os aceptores de elétrons utilizados são o sulfato e o dióxido de carbono, que são convertidos em sulfeto e metano, respectivamente (ARCEIVALA *apud* VON SPERLING, 2016b).

3.2.2 Ecologia do tratamento de esgotos

O papel desempenhado pelos microrganismos no tratamento biológico de esgoto depende do processo a ser utilizado. Para o processo de tratamento de esgoto por lodos ativados destacam-se as bactérias aeróbias, por isso, a ETE deve considerar os equipamentos responsáveis por transferir oxigênio ao meio líquido, bem como com corpo técnico para operação deste tipo de sistema. Em alguns casos adaptados do processo de lodos ativados há bactérias que atuam em condições anóxicas e realizam a desnitrificação.

A massa microbiana envolvida nos processos aeróbios é constituída basicamente por bactérias e protozoários. Outros organismos como fungos e rotíferos podem ser encontrados, mas possuem menor relevância, no entanto, fungos filamentosos podem prejudicar a sedimentabilidade do lodo, reduzindo a eficiência do processo. Os rotíferos são eficientes no consumo de bactérias dispersas e de pequenas partículas de matéria orgânica e sua presença no efluente indica um eficiente processo de purificação biológica (METCALF & EDDY, 2016). Os principais microrganismo presentes em sistemas de tratamento estão listados no Quadro 3.

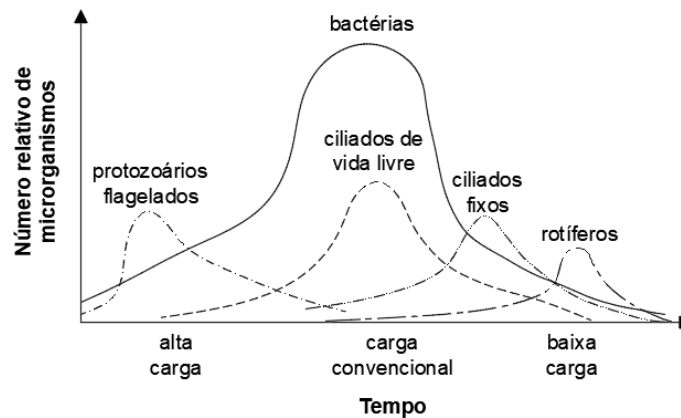
Quadro 3 – Principais microrganismos para o tratamento biológico dos esgotos

Microrganismo	Descrição
Bactérias	<ul style="list-style-type: none"> • Organismos unicelulares. • Divergem-se em várias formas e tamanhos. • Principais responsáveis pela oxidação da matéria orgânica. • Alguns organismos podem ser patogênicos, podendo causar problemas gastrointestinais.
Protozoários	<ul style="list-style-type: none"> • Organismos unicelular e sem parede celular. • A maioria é aeróbia ou facultativa. • Alimentam-se de bactérias, algas e outros microrganismos. • São responsáveis pela manutenção equilíbrio entre os diversos grupos que compõem o tratamento biológico. • Alguns são patogênicos.
Fungos	<ul style="list-style-type: none"> • Organismos aeróbios, multicelulares, não fotossintético, heterotróficos. • De grande importância na oxidação da matéria orgânica. • Podem crescer em condições de baixo pH.

Fonte: Silva e Mara (1979), Tchobanoglous e Schroeder (1985), Metcalf & Eddy (2016)

O convívio da comunidade microbiana faz com que o aumento de um grupo resulte no declínio de outro decorrente às características seletivas exercidas pelo meio em transformação. No momento em que o esgoto é introduzido ao sistema de tratamento a matéria orgânica (medida indiretamente pela Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO) encontra-se em sua máxima concentração. Neste momento a população de bactérias ainda é reduzida e os protozoários do tipo ameba podem ser encontrados – são ineficientes na competição por alimento e são encontrados principalmente no início do funcionamento dos reatores. Devido a esta grande concentração de substrato a população bacteriana cresce e as amebas são substituídas por protozoários flagelados, que devido à sua mobilidade são mais eficientes na competição por alimentos. Estes flagelados são característicos de sistemas de alta carga. Na sequência, com a redução da concentração de matéria orgânica os protozoários ciliados substituem os protozoários flagelados, uma vez são capazes de sobreviver em meios com reduzida oferta de alimento. Este ponto é caracterizado pela operação dos sistemas de carga convencional, onde envolvem-se um grande número de ciliados de vida livre, o número máximo de bactérias e uma baixa concentração de matéria orgânica (DBO remanescente). Em sistemas de tratamento com longos tempos de detenção hidráulica, característicos dos sistemas de baixa carga, a matéria orgânica disponível é mínima e as bactérias são consumidas por ciliados e rotíferos (KÖNIG, 1990). Na Figura 1 está exposto a predominância relativa dos microrganismos em função da carga afluyente de matéria orgânica.

Figura 1 – Predominância relativa dos microrganismos



Fonte: Adaptado de Eckenfelder e Grau (1992)

3.2.2.1 *Tipos de crescimento e sustentação da biomassa*

Segundo von Sperling (2016b), com relação ao crescimento e sustentação da biomassa no tratamento biológico, ele pode ocorrer de duas maneiras: em suspensão ou aderido. No crescimento em suspensão, a biomassa se desenvolve de forma dispersa no meio líquido, sem qualquer estrutura de suporte. Já no crescimento aderido, a biomassa cresce de forma aderida a um meio suporte, formando um biofilme. O meio suporte pode ser constituído de material sólido natural (pedras, área, solo) ou sintético (plástico) ou constituído pela própria biomassa aglomerada (grânulo). Neste trabalho, será dado foco no crescimento disperso, que forma o floco biológico dos sistemas de lodos ativados.

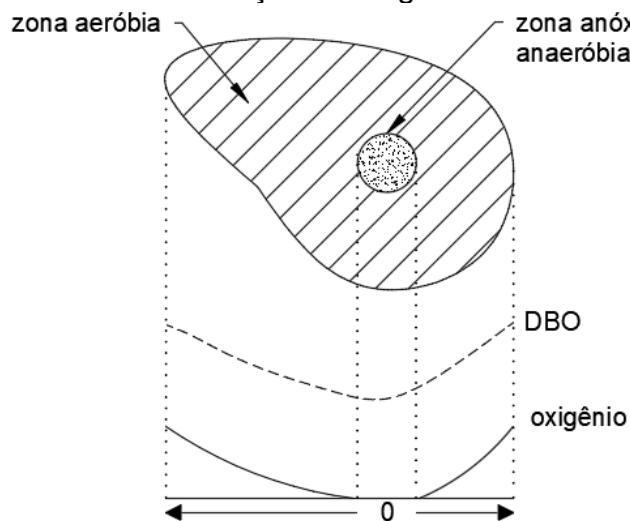
Ainda de acordo com von Sperling (2016b), em processos de lodos ativados, os microrganismos se concentram, formando uma unidade estrutural maior denominada floco. A propriedade destes microrganismos formarem flocos é uma característica importante que contribuiu para o tratamento biológico, pois permite que todos os organismos organizados nesta unidade estrutural se separem do líquido através de processos físicos simples, como a sedimentação. Portanto, a característica do efluente final é caracterizada por baixa concentração de DBO solúvel (removida no reator biológico) e baixa DBO em suspensão, onde os flocos são removidos no decantador secundário através do processo físico de sedimentação. Além disso, conclui-se que o mecanismo de floculação que normalmente ocorre por adição de compostos químicos, ocorre de forma natural no processo de tratamento biológico.

O floco é formado por diversos microrganismos, apresentando estrutura heterogênea. Dentre os organismos que podem compor o floco, destacam-se as bactérias, protozoários, fungos, rotíferos, nematoides e até mesmo larvas de insetos. Além dos seres vivos, há a presença de material inerte oriundo do esgoto, material orgânico adsorvido e células vivas e mortas.

A DBO que adentra ao sistema, tanto solúvel quanto particulada, pode ficar aproximadamente 40% absorvidas pela matriz do floco por meio de interações iônicas. O material particulado é hidrolisado por exoenzimas antes da sua absorção e metabolização pelas bactérias. Considera-se que o diâmetro de um floco se situa na faixa de 50 a 500 μm e nele há um gradiente de concentração de DBO e oxigênio dissolvido que diminui quanto mais adentro do floco, isto é, pode haver valores nulos de oxigênio na parte mais interna do floco. Uma consequência disto e em virtude da carência de nutrientes para as bactérias que se situam ao centro do floco é a baixa viabilidade para sobrevivências das mesmas nesta região (HORAN, 1990). Em trabalhos práticos, quando há concentração de 0,50 mg/L de oxigênio dissolvido no meio líquido é considerado como condições anóxicas, pois, embora o líquido contenha oxigênio livre, uma grande parte do floco estará desprovido de oxigênio (VON SPERLING, 2016b).

Na Figura 2 é possível observar o gradiente de concentração de DBO e oxigênio em um floco de lodo ativado.

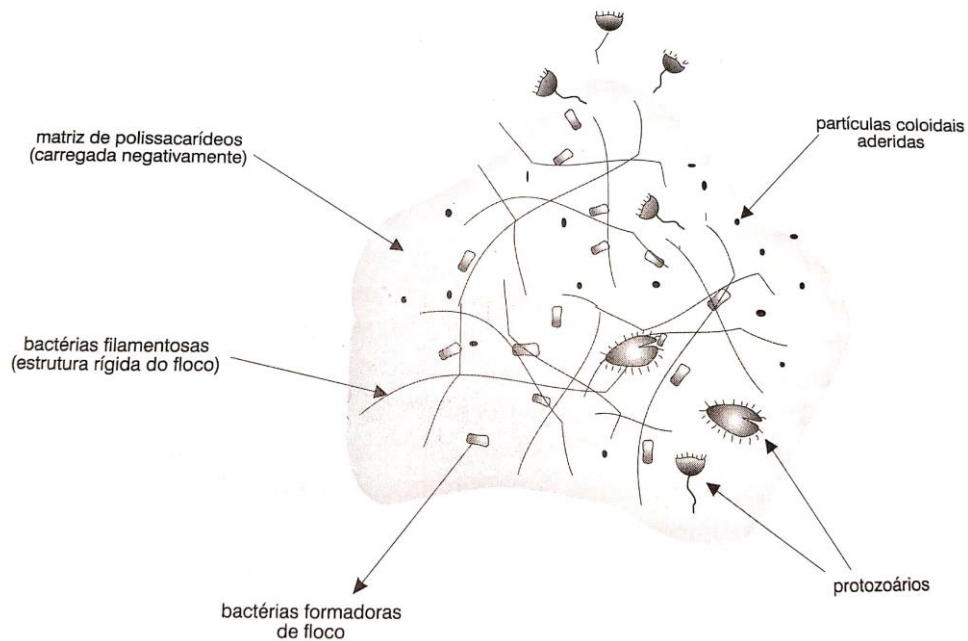
Figura 2 – Gradiente de concentração de oxigênio e DBO em um floco bacteriano



Fonte: Adaptado de von Sperling (2016a)

Uma hipótese muito aceita para a formação dos flocos é que as bactérias filamentosas exerçam função de matriz estrutural, no qual as bactérias formadoras de flocos se aderem. Na Figura 3 é possível observar como é a estrutura de um floco de lodo ativado.

Figura 3 – Composição microbiana de um floco de lodo ativado



Fonte: Retirado de von Sperling (2016a)

De acordo com Horan (1990), o equilíbrio entre os organismos filamentosos e os formadores de flocos é uma variável de extrema importância no tratamento biológico, e disso depende parte do sucesso operacional da estação de tratamento de esgoto por lodos ativados. Três situações podem ocorrer:

- Equilíbrio entre organismos filamentosos e formadores de floco: a característica deste equilíbrio é boa sedimentabilidade e adensabilidade do lodo.
- Predominância dos organismos formadores de floco: as características dessa relação é a insuficiente rigidez do floco, gerando um floco pequeno e fraco e com má sedimentabilidade.
- Predominância dos organismos filamentosos: com esta relação os filamentos se projetam para fora do floco, impedindo a aderência de outros flocos. Sendo assim, após a sedimentação o volume ocupado pelo floco é maior do que deveria, podendo trazer problemas na

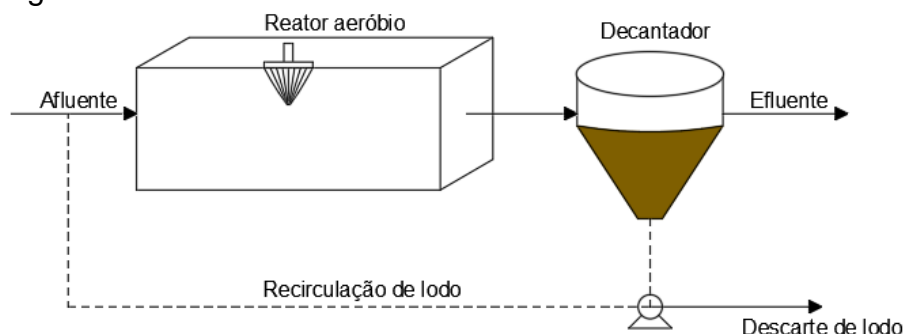
operação do decantador secundário, causando a deterioração da qualidade do efluente final, uma vez que o lodo não sedimenta e sai junto com a fração líquida.

3.3 O PROCESSO DE LODOS ATIVADOS

O sistema de tratamento por lodos ativados teve sua origem datada em 1914 no Reino Unido, por Arden e Lockett. Eles verificaram que o lodo desempenhava um papel fundamental nos resultados obtidos pela aeração. O processo desenvolvido passou a ser chamado por eles de lodo ativado, devido à formação de uma massa ativa de microrganismos responsáveis pela estabilização aeróbia da matéria orgânica presente nos efluentes (METCALF & EDDY, 2016). Os primeiros sistemas eram semelhantes aos reatores por batelada atuais, com ciclos de enchimento e esvaziamento. Somente posteriormente foi concebido o sistema de fluxo contínuo, que é amplamente utilizado atualmente em maior escala. O sistema de lodos ativados é utilizado a nível mundial para o tratamento de despejos domésticos e industriais com características biológicas, principalmente em situações em que é exigida elevada qualidade do efluente e pequenos requisitos de área (GRAY, 1990).

O fluxograma básico do sistema de lodos ativados é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Unidades de tratamento do sistema de lodos ativados



Fonte: Adaptado de von Sperling (2016a)

É no reator aeróbio onde ocorrem as reações bioquímicas de remoção da matéria orgânica carbonácea e, em alguns casos, da matéria nitrogenada. Os microrganismos que compõem a biomassa utilizam o substrato presente no esgoto para o seu metabolismo. A biomassa que compõe esse sistema é aerada e mantida em suspensão neste reator. No decantador secundário ocorre separação das fases

líquida e sólida, onde a biomassa sedimenta, enquanto a água decantada sai clarificada na parte superior do tanque. Os sólidos que se depositam no fundo do decantador são recirculados para o tanque de aeração, fazendo com que a concentração de biomassa no reator aumente, sendo este processo o responsável pela elevada eficiência do sistema (METCALF & EDDY, 2016).

A biomassa consegue sedimentar facilmente e separar-se do líquido no decantador secundário devido à sua propriedade de flocular. A boa e efetiva formação de flocos dependerá das características da biomassa. Se a presença de bactérias formadoras de flocos e bactérias filamentosas estiverem na proporção adequada, o floco será pesado e firme, contribuindo para boa sedimentação do mesmo (HORAN, 1990).

De acordo com Lapolli e Barcia (1993), o lodo de retorno é um excelente acelerador do processo de estabilização da matéria orgânica, pois além de ser um inoculante para o efluente do tanque de aeração, também possui alta capacidade de depuração. Devido à recirculação de lodo, este permanece no sistema por um tempo superior ao líquido. O tempo de retenção celular é também conhecido como idade do lodo e é essa maior permanência dos sólidos no sistema que garante maior eficiência no sistema de lodos ativados, uma vez que a biomassa tem tempo suficiente para metabolizar praticamente toda a matéria orgânica do esgoto a ser tratado.

No tanque de aeração, os microrganismos se desenvolvem e se reproduzem de forma contínua devido ao suprimento constante de substrato. No entanto, se esses microrganismos continuarem a crescer indefinidamente, a concentração de oxigênio diminuirá drasticamente devido ao seu alto consumo, resultando em dificuldades na transferência de oxigênio para as células microbianas. Além disso, essa situação pode sobrecarregar o decantador secundário, impedindo que os sólidos se sedimentem adequadamente. Como resultado, os sólidos podem sair junto com o efluente final, comprometendo a qualidade do esgoto descarregado no meio ambiente. Portanto, para manter o sistema em equilíbrio é imprescindível que se retire aproximadamente a mesma quantidade de biomassa que é aumentada por reprodução. Este é o lodo excedente, que pode ser retirado diretamente pelo reator aeróbio ou na linha de recirculação do lodo. Este lodo excedente não está estabilizado e deve sofrer tratamento adicional, isto é, adensamento, estabilização e desidratação (GRAY, 1990).

Devido à importância nas condições de um país tropical, o sistema de lodos ativados pode ser adaptado para incluir remoções biológicas de nitrogênio e fósforo através da alternância entre ambientes aeróbios, anóxicos e anaeróbios. Os processos de remoção destes nutrientes serão abordados com mais profundidade a seguir.

3.3.1 Variantes do processo de lodos ativados

Segundo Jordão e Pessôa (1995), devido à necessidade de aprimoramento das eficiências, bem como redução de custos operacionais e visando fugir da patente inglesa, buscou-se inovações ao processo clássico de lodos ativados. O processo de lodos ativados pode ser classificado com base na idade do lodo e no fluxo. Em relação à idade do lodo, existem dois tipos principais: o lodo ativado convencional, com uma faixa de idade entre 4 e 10 dias, e o lodo ativado de aeração prolongada, com uma faixa de idade do lodo entre 18 e 30 dias (VON SPERLING, 2016a). Quanto ao fluxo, destacam-se o fluxo contínuo e o fluxo intermitente (batelada). O presente trabalho abordará apenas o sistema de tratamento de esgoto do tipo lodos ativados convencional e de fluxo contínuo.

É importante frisar que a etapa biológica do sistema de lodos ativados (reator biológico e decantador secundário) pode receber esgoto bruto (usualmente tratado na modalidade de aeração prolongada), efluentes de decantadores primários (concepção clássica do sistema de lodos ativados convencional), efluentes de reator anaeróbio e efluentes de outros processos de tratamento de esgotos, como o tratamento físico-químico ou filtros biológicos.

3.3.1.1 *Lodos ativados convencional de fluxo contínuo*

No sistema convencional parte da matéria orgânica, seja em suspensão ou sedimentável, é retirada antes do tanque de aeração, através do decantador primário, reduzindo os custos operacionais e de energia. Assim, o sistema de lodos ativados convencional tem como parte integrante o tratamento primário do esgoto (VON SPERLING, 2016a).

De acordo com Jordão e Pessôa (1995), no sistema convencional de lodos ativados, a idade do lodo geralmente varia de 4 a 15 dias, enquanto o tempo de detenção hidráulica no reator varia de 2 a 6 horas. Por outro lado, von Sperling (2016a) indica que a idade do lodo nesse sistema está entre 4 e 10 dias, com um tempo de detenção hidráulica de 6 a 8 horas. Com essa idade do lodo, a biomassa retirada do sistema ainda pode conter uma quantidade significativa de matéria orgânica armazenada em suas células, que precisa ser estabilizada. Portanto, para reduzir o volume dos digestores, o lodo passa por uma etapa de adensamento, na qual parte da umidade é removida, resultando em uma diminuição do volume de lodo a ser tratado.

3.3.2 Remoção biológica de nutrientes

A remoção biológica de nitrogênio (RBN) em ETE ocorre por meio de processos sequenciais de nitrificação e desnitrificação. Durante a nitrificação, bactérias autotróficas estão envolvidas na oxidação de amônia a nitrito e principalmente a nitrato. Este processo necessita da presença de oxigênio dissolvido e, portanto, só é possível em um ambiente aeróbio. Durante a desnitrificação, o nitrato ou nitrito é reduzido a nitrogênio molecular usando matéria orgânica como agente redutor e bactérias heterotróficas para mediar o processo. O efeito dos processos subsequentes de nitrificação e desnitrificação é a conversão do nitrogênio amoniacal em nitrogênio molecular, que é liberado da fase líquida na forma gasosa (MOTA; VON SPERLING, 2009).

Sem alterações no processo de lodos ativados, este sistema é capaz de produzir a conversão satisfatórias de amônia para nitrato (nitrificação) e neste caso há apenas a remoção de amônia, mas não de nitrogênio. Em regiões de clima quente, o processo de nitrificação pode ocorrer quase que sistematicamente desde que as condições de operacionalidade sejam mantidas, tais como oxigênio dissolvido disponível, pH ideal, disponibilidade de biomassa e ausência de substância tóxicas inibidoras deste processo.

A rota biológica tradicional para a remoção de nitrogênio envolve condições anóxicas, caracterizadas pela ausência de oxigênio dissolvido, mas com presença de nitrato. Nesse contexto, ocorre o processo de desnitrificação, no qual um grupo específico de bactérias utiliza nitratos como acceptor de elétrons em seu processo

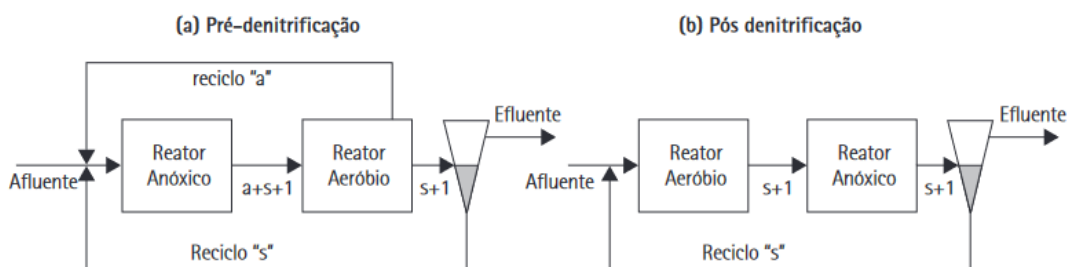
respiratório, convertendo-os em nitrogênio gasoso, um gás inerte para o meio ambiente, que é liberado para a atmosfera (VON SPERLING, 2016a). Para a ocorrência deste processo no sistema de lodos ativados são necessárias modificações para que ocorram presenças de zonas anóxicas, seja no reator aeróbio ou num reator anterior ao aeróbio, onde a condição de anoxia é ocasionada através da recirculação do lodo aerado ou do licor misto. Também é possível remover nitrogênio com processos físico-químicos, ou utilizando rotas microbiológicas alternativas, como as que envolvem as bactérias do grupo Anammox.

De acordo com von Sperling (2016a), em sistemas de lodos ativados que ocorre a nitrificação é interessante que seja ocasionada também a desnitrificação por motivos puramente operacionais, como: (a) economia de oxigênio (economia de energia na aeração), (b) melhor operação do decantador secundário (evitar lodo ascendente) e (c) controle de nutrientes no corpo receptor (eutrofização).

Para que ocorra nitrificação e desnitrificação, é necessário que a biomassa se encontre de forma alternada em ambiente aeróbio e anóxico. Isto pode se dar por interrupções de aeração em sistemas de reator único, ou utilizando a divisão do reator em dois ambientes. O sistema de pré-desnitrificação, proposto por Ludzack e Ettinger (1962) propõe o uso de um reator anóxico precedendo o reator aeróbio apenas com o reciclo do lodo. Contudo, de acordo com Metcalf & Eddy (2016), posteriormente foi adicionado um reciclo interno do reator aeróbio para o tanque anóxico, melhorando o projeto original de Ludzack-Ettinger. Este modelo é conhecido como Ludzack-Ettinger modificado (MLE). Sendo assim, a matéria orgânica para a desnitrificação advém do efluente bruto e o nitrato advém do reator aeróbio, através de uma recirculação do licor misto, além da recirculação do próprio lodo do decantador secundário.

Na Figura 5 é possível observar o sistema de pré-desnitrificação mencionado, bem como o sistema de pós-desnitrificação.

Figura 5 – (a) Sistema de pré-desnitrificação; e (b) Sistema de pós desnitrificação



Fonte: Adaptado de Mota e Sperling (2009)

Como já mencionado, o primeiro conceito de RBN pré-anóxica de Ludzack e Ettinger (de 1962) não incluía a recirculação do reator aeróbio, apenas do lodo de retorno do decantador secundário. Assim, a desnitrificação era limitada pela taxa de retorno do lodo. Para melhorar o processo de desnitrificação, a recirculação interna do reator aeróbio pode ser implementada ou a vazão do lodo recirculado pode ser aumentada. No entanto, cada uma dessas estratégias possui limites operacionais.

No início do desenvolvimento da tecnologia de remoção de fósforo, foram utilizados principalmente métodos físico-químicos, principalmente a precipitação com metais, formando alguns fosfatos solúveis como fosfato de cálcio $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, apatita $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$ ou estruvita (NH_4MgPO_4). No entanto, essa estratégia foi rapidamente abandonada por dois motivos: (a) para obter de forma confiável uma baixa concentração de P, é necessário adicionar uma alta concentração de sais (geralmente muito maior do que seria necessário se o equilíbrio termodinâmico fosse alcançado rapidamente), então o custo dos produtos químicos é alto e a massa de lodo químico é alto e (b) a adição de sais cria outro problema: o acúmulo de íons na água (o que pode limitar severamente a aplicabilidade da água para diversos usos) (MOTA; VON SPERLING, 2009).

Por essas razões, a pesquisa sobre remoção de fósforo voltou-se para métodos biológicos. Hoje, no desenvolvimento de sistemas de remoção de fósforo são utilizados métodos físico-químicos, na maioria dos casos como coadjuvantes ou complementares ao método biológico. O aspecto fundamental da remoção biológica de fósforo é o chamado “absorção em excesso de P pelo lodo”. Sob certas condições operacionais, é possível desenvolver um lodo com um teor de fósforo muito maior do que os 2,5% normalmente encontrados em lodos de sistemas convencionais (MOTA; VON SPERLING, 2009).

É necessário que na linha de tratamento haja inicialmente uma zona anaeróbia, onde o afluente (rico em material biodegradável) é descarregado. Na condição de anaerobiose, para obter energia para a assimilação dessa matéria orgânica, bactérias específicas (*Acinetobacter*) começam a quebrar as cadeias de reserva energética ATP-ADP e liberam o fosfato da massa bacteriana para a fase líquida. Como resultado, ocorre uma concentração muito maior de fósforo no líquido em comparação com o afluente. Na zona aeróbia subsequente, essas bactérias reabsorvem o fósforo, porém em quantidades muito maiores do que as necessárias

para o metabolismo bacteriano. Portanto, a remoção total em sistemas com zona anaeróbia é significativamente maior do que em sistemas sem zona anaeróbia. Por fim, o excesso de lodo descartado carrega consigo a massa de fósforo absorvida, removendo-a do sistema.

Portanto, para a remoção biológica de fósforo é necessário que na linha de tratamento tenha variância de meios em condições aeróbias e anaeróbias, sendo que esta última é considerada uma zona seletora para os organismos acumuladores de fósforo (PAO). A zona anaeróbia propicia uma vantagem competitiva aos PAO, uma vez que podem assimilar o substrato antes de outros microrganismos que não armazenam fósforo. Desta forma, esta zona anaeróbia permite o desenvolvimento de grande população destes organismos, que assimilam fósforo do meio líquido em proporções superiores aos requisitos metabólicos normais (VON SPERLING, 2016b).

3.4 CONTROLE OPERACIONAL DO SISTEMA DE LODOS ATIVADOS

As cargas afluentes de uma estação de tratamento de esgotos são altamente variáveis, representando um incentivo à implementação do controle operacional de sistema de tratamento biológicos. Uma complexidade adicional dos sistemas biológicos está relacionada a sua própria dinâmica, onde contém (a) não linearidades, (b) amplas faixas de constantes de tempo, (c) cultura diversificada de microrganismos metabolizando um substrato heterogêneo, (d) imprecisão e (e) estabilidade interrompida por falhas abruptas. Os principais objetivos da implementação do controle operacional em uma estação de tratamento de águas residuais podem ser (VON SPERLING, 2016a):

- Produzir efluente final de qualidade que atenda aos padrões de lançamento;
- Reduzir as flutuações na qualidade das águas residuais;
- Evitar grandes falhas de processo;
- Reduzir custos operacionais;
- Aumentar a capacidade de tratamento sem expandir fisicamente o sistema;
- Implementar operação de eficiência variável para compensar variações sazonais; e

- Reduzir a necessidade de mão de obra.

O controle operacional de uma estação de tratamento de esgoto pode ser classificado da seguinte forma (ANDREWS, 1972):

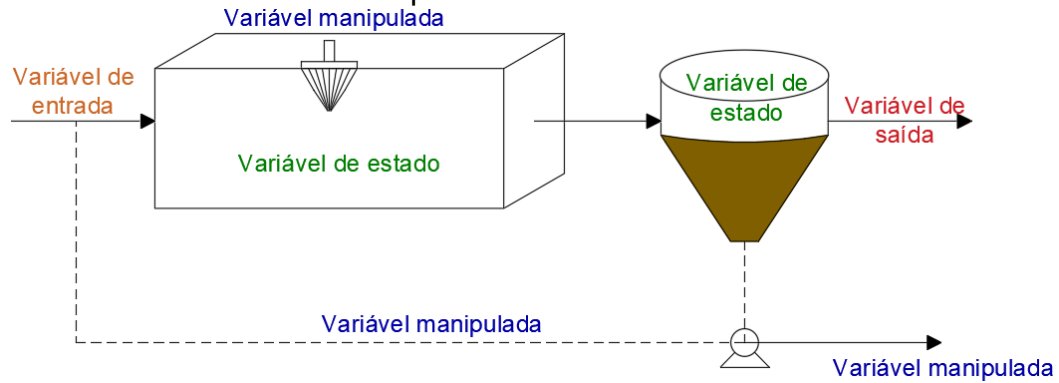
- Operação manual com (a) avaliação de desempenho por sentidos humanos e (b) controle manual do processo;
- Operação manual, envolvendo (a) avaliação de desempenho por análises ou instrumentos indicadores ou registradores e (b) controle manual do processo; e
- Controle automático, com (a) avaliação de desempenho por sensores automatizados e (b) controle automatizado dos processos.

Em um sistema de controle, um passo importante é a identificação das variáveis envolvidas no processo, dentre elas distinguem-se (VON SPERLING; LUMBERS, 1988; VON SPERLING, 2016a):

- **Variáveis de entrada:** são variáveis que forçam o sistema e não podem ser controladas como, por exemplo, as características do afluente como vazão, carga orgânica, sólidos em suspensão e nutrientes;
- **Variáveis de controle (variáveis de estado e/ou variáveis de saída):** são as variáveis que necessitam serem controladas e incluem as variáveis de estado como, por exemplo, sólidos suspensos no tanque de aeração, oxigênio dissolvido e Índice Volumétrico de Lodo (IVL). Ademais, também está inclusa as variáveis de saída (DBO, Sólidos Suspensos (SS) e nutrientes na saída do sistema);
- **Variáveis medidas (variáveis de entrada e/ou variáveis de controle):** inclui as variáveis de entrada e controle, as quais fornecem informações para a definição da ação de controle;
- **Variáveis manipuladas:** são as variáveis alteradas de modo que se mantenha as variáveis de controle na faixa desejada. São elas: nível de aeração – taxa de transferência de oxigênio ($K_L a$), vazão de recirculação de lodo (Q_r), vazão de retirada de lodo excedente (Q_{ex}), vazão afluente (caso haja tanque de equalização) e variação do ponto de entrada do efluente (em reatores de alimentação escalonada).

A Figura 6 retrata as variáveis no sistema de tratamento biológico por lodos ativados.

Figura 6 – Variáveis no controle operacional de um sistema de tratamento de esgoto por lodos ativados



Fonte: Adaptado de von Sperling (2016a)

3.4.1 Controle do oxigênio dissolvido

A demanda de oxigênio apresenta variação temporal devido às flutuações nas cargas de DBO e amônia, seguindo um padrão relacionado aos horários de maior consumo de água e, conseqüentemente, geração de esgoto. Essas variações podem incluir componentes não previsíveis ou aleatórios. Ao fornecer oxigênio a uma taxa constante que corresponda à demanda média de oxigênio, ocorrem períodos de excesso ou falta de aeração ao longo do dia. Para evitar essa situação, muitas vezes adota-se uma taxa de transferência de oxigênio que corresponda à demanda máxima, o que resulta em fases de excesso de aeração durante o dia. O controle do oxigênio dissolvido tem como objetivo ajustar a oferta de oxigênio de acordo com o seu consumo (VON SPERLING, 2016b).

Os métodos de regulação do oxigênio variam de acordo o tipo de aeração, nomeadamente (FLANAGAN *et al.*, 1977; WPCF/ASCE, 1988):

- Aeração mecânica
 - Liga/desliga de aeradores;
 - Variação da velocidade de rotação dos aeradores;
 - Variação do nível das pás dos aeradores (variação da submersão dos aeradores através do seu eixo);

- Variação do nível do líquido (variação da submersão dos aeradores através do ajuste do vertedor de saída).
- Aeração por ar difuso
 - Variação da velocidade dos sopradores;
 - Variação das aletas de entrada;
 - Ajuste das válvulas de sucção de todos os sopradores ligados, de forma a manter uma pressão constante na tubulação de alimentação de ar.

As soluções convencionais, em termos de OD, são variação da taxa e transferência de oxigênio em função da hora do dia, vazão afluyente e por controle *feedback* de OD. O controle *feedback* nada mais é do que a medição de OD em campo e tomada de decisão através do resultado obtido.

3.4.2 Controle de sólidos

As principais variáveis que podem ser manipuladas para o controle de sólidos são a vazão de recirculação de lodo e a vazão de lodo excedente. Do ponto de vista prático, a vazão de lodo excedente controla a massa total de sólidos em suspensão no sistema e a mantém em determinado valor, e a vazão de recirculação de lodo controla o equilíbrio entre a massa de sólidos em suspensão no reator e no decantador secundário para mantê-lo em uma relação especificada.

3.4.2.1 Vazão de recirculação de lodo (Q_r)

De acordo com von Sperling e Lumbers (1988), as estratégias mais utilizadas para a manipulação de Q_r são:

- **Q_r constante:** A vazão de recirculação do lodo constante corresponde a uma estratégia de não controle bastante simples e utilizada em diferentes estações de tratamento de águas residuais. Entretanto, a vazão de recirculação deve ser alta o suficiente para neutralizar as flutuações na carga de sólidos nos decantadores (LOHMANN; SCHLEGEL, 1981) tanto na vazão quanto em Sólidos Suspensos no Tanque de Aeração (SSTA), principalmente as flutuações diárias. Para

atingir esse objetivo, normalmente utiliza-se uma vazão maior, recirculando, em média, mais lodo do que o necessário.

- **Q_r proporcional à vazão afluente Q :** Outra estratégia muito comum é manter Q_r proporcional a Q assumindo uma relação Q_r/Q fixa. Isso reduz a quantidade total de lodo a ser bombeado (LOHMANN; SCHLEGEL, 1981) e garante melhor balanceamento das cargas no decantador.
- **Q_r em função de IVL:** um valor alto de IVL indica baixa sedimentabilidade do lodo e possivelmente a necessidade de aumentar o Q_r .
- **Q_r em função do nível de manta de lodo nos decantadores secundários:** este método proporciona a melhor garantia contra a perda de sólidos no efluente. Seu princípio é controlar a vazão de recirculação com base na altura da camada de lodo no decantador secundário. Embora assumir que a vazão de recirculação seja uma função contínua do nível da camada de lodo possa apresentar algumas dificuldades, aumentar ou diminuir Q_r quando o nível de lodo atinge uma determinada altura é uma solução prática. Por exemplo, se a camada de lodo atingir uma altura específica elevada, um sensor localizado nessa posição irá detectá-la e enviará um comando para abrir mais a válvula de saída de lodo do decantador, aumentando a vazão. Esse controle também pode ser realizado manualmente pelo operador de forma menos intensiva.

3.4.2.2 Vazão de lodo excedente (Q_{ex})

O controle manual da taxa de descarte de lodo excedente é amplamente praticado nas estações de tratamento de esgoto por lodos ativados. As estratégias mais clássicas são (VON SPERLING, 2016a):

a. Controle de SSTA (SSTA constante)

Com um adequado nível de SSTA mantido, é esperado que a qualidade do efluente seja boa. Em termos de DBO solúvel, em condições estáveis, controlar a concentração de SSTA pela remoção do excesso de lodo equivale a controlar a relação A/M e a idade do lodo. Entretanto, durante a operação de uma estação de tratamento de esgoto raramente ocorrem estados estáveis, e o sistema trabalha praticamente sempre em estado dinâmico (variação contínua de vazões e concentrações afluente, causando mudanças contínuas nas variáveis de estado).

Para o controle de SSTA utiliza-se, mais frequentemente, a manipulação da vazão de lodo excedente, embora possa ser utilizada, dentro de certos limites, a manipulação da vazão de lodo de retorno. Selecionar o nível SSTA desejado é essencial para um controle bem-sucedido. Os aspectos críticos neste contexto são:

- Um SSTA constante implica uma carga variável de sólidos no decantador, uma vez que a vazão de entrada geralmente é variável. Dependendo do nível de SSTA, essa variabilidade pode afetar o desempenho do sistema em relação aos sólidos suspensos no efluente.
- O nível de SSTA afeta tanto a remoção de matéria carbonácea quanto a nitrificação e desnitrificação. Valores mais altos de SSTA podem aumentar a eficiência de remoção de DBO, mas ao mesmo tempo causar maior consumo de oxigênio dissolvido, o que pode levar a uma possível redução da concentração de OD no reator e comprometer a nitrificação.

b. Controle de carga de lodo (relação A/M constante)

A relação A/M representa a carga de substrato por unidade de massa de lodo, é também conhecida como carga de lodo. A relação A/M é dada pela Equação 1.

$$\frac{A}{M} = \frac{Q \cdot S_0}{V \cdot X} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

A/M = relação alimento/microrganismo (d⁻¹)

Q = Vazão afluente (m³/d)

S_0 = concentração de substrato afluente (DBO₅ ou DQO) (g/m³)

X = concentração de biomassa (total – SSTA, volátil – SSVTA ou ativa) (g/m³)

V = volume do reator (m³)

O objetivo do controle da relação A/M é manter um valor constante, a fim de garantir uma remoção uniforme de substrato. O valor da relação A/M é geralmente determinado durante o projeto, mas pode sofrer ajustes com base na experiência operacional. Para controlar a relação A/M deve-se ajustar a concentração de sólidos – por manipulação de Q_{ex} ou Q_r – em função da carga afluente de substrato.

Contudo, alguns problemas estão relacionados ao controle da relação A/M, são eles:

- A DBO₅ não pode ser utilizada no controle como indicador do substrato, visto que são necessários 5 dias para se obter o resultado da análise deste parâmetro;
- A unidade d⁻¹ é confusa para os operadores;
- A relação A/M é um parâmetro estacionário e a estação de tratamento de esgoto é constituída por processos dinâmicos, portanto, não é válida sua associação com a qualidade do esgoto tratado;
- O aumento de SSTA para manter A/M constante podem causar uma sobrecarga de sólidos no decantador secundário, com possível aumento de DBO particulada no efluente tratado.

c. Controle da idade do lodo (θ_c constante):

A idade do lodo, ou tempo de retenção celular, refere-se ao tempo médio que uma unidade de biomassa permanece no sistema. Em condições estáveis de operação, a taxa de crescimento de biomassa deve ser contrabalanceada com a retirada de lodo em excesso, de tal maneira que a concentração de biomassa seja constante no sistema. Em condições de equilíbrio, onde a produção de biomassa é igual ao seu descarte, a idade do lodo é definida conforme Equação 2.

$$\theta_c = \frac{\text{massa de sólidos no sistema}}{\text{massa de sólidos produzida por dia}}$$

Equação 2

$$= \frac{\text{massa de sólidos no sistema}}{\text{massa de sólidos descartada por dia}}$$

O controle da idade do lodo é alcançado por meio de ações hidráulicas, como o descarte dos sólidos na linha de recirculação do lodo, onde a concentração do lodo excedente é igual à concentração do lodo de retorno, ou no tanque de aeração, onde a concentração do lodo excedente é igual à SSTA. Este controle é simples, ao se desejar manter uma idade do lodo de 10 dias, deve-se descartar por dia um volume igual a 1/10 (10%) do reator. Mesmo com a variação da carga afluyente a idade do lodo permanecerá constante, uma vez que tanto a massa de sólidos presente no sistema quanto a massa de sólidos sendo descartada aumentarão proporcionalmente.

No entanto, tais considerações se aplicam apenas à operação em estado estacionário ou hipotético de operação, não considerando as transições de um estado para o outro. Isso ocorre porque na operação real da estação os transientes ocorrem com mais frequência do que o estado estacionário. Em condições dinâmicas, as duas relações na Equação 2 não são mais iguais e a produção de lodo é diferente do descarte, resultando em acúmulo de massa positivo ou negativo no reator aeróbio. A hipótese do estado estacionário assume que um rápido aumento na concentração de substrato é imediatamente acompanhado por um aumento na concentração de biomassa. No entanto, o crescimento bacteriano leva tempo e a degradação do efluente é observada até que um novo estado estacionário seja alcançado (se for alcançado).

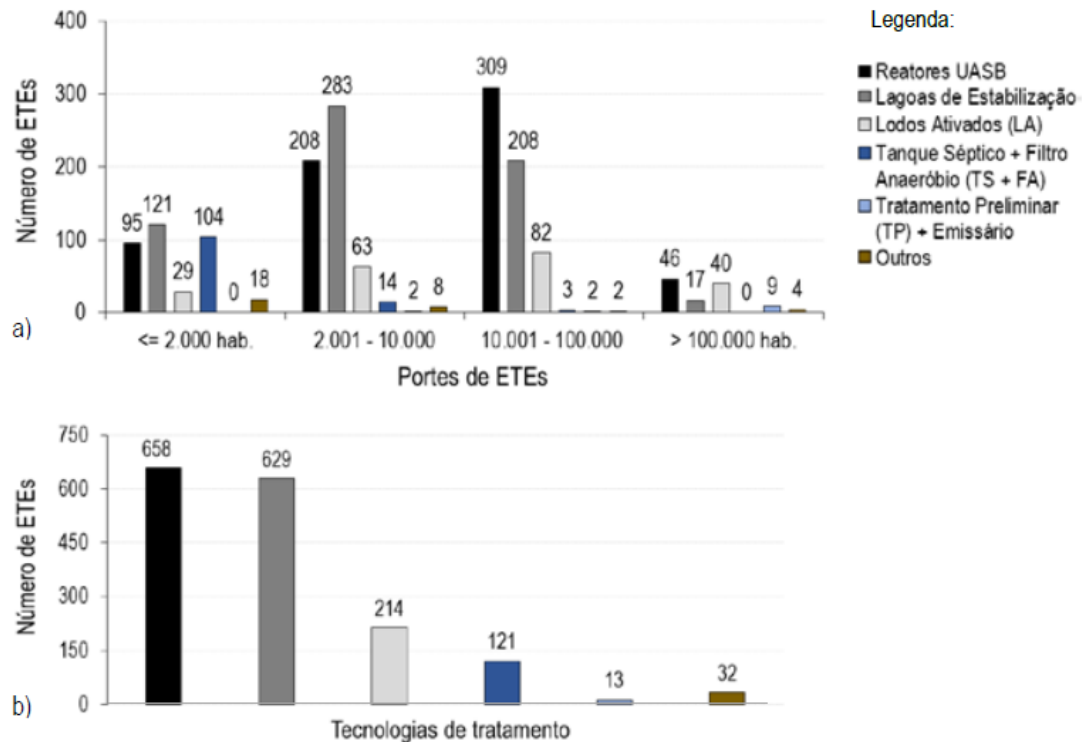
Além disso, o conceito de idade do lodo refere-se à idade das bactérias envolvidas na oxidação da matéria orgânica carbonácea. No entanto, a idade das bactérias nitrificantes, que têm uma taxa de crescimento mais lenta em comparação com as bactérias heterotróficas responsáveis pela degradação da matéria orgânica, não é considerada. Portanto, não existe uma idade de lodo geral para todas as bactérias.

3.5 APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA DE LODOS ATIVADOS PARA TRATAMENTO DE ESGOTO NO CONTEXTO BRASILEIRO

Chernicharo *et al.* (2018) evidenciou as tecnologias de tratamento de esgoto entre os Estados de Santa Catarina, Paraná, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Rio de

Janeiro, Minas Gerais e o Distrito Federal, totalizando 1.667 estações que foram setorizadas por portes, conforme Figura 7 apresentada a seguir.

Figura 7 – a) Número de ETEs por categoria de município; e b) Número total de ETEs por tecnologia de tratamento.



Fonte: Retirado de Chernicharo *et al.* (2018)

Com relação ao processo de lodos ativados, nota-se que o envolvimento relativo dessa tecnologia aumenta à medida que aumenta o tamanho da ETE. Chernicharo *et al.* (2018) observou que os sistemas com lodo ativado representam cerca de 10% das estações instaladas nas estações menores, e esse percentual sobe para cerca de 35% nas estações maiores. O processo de lodos ativados representa 35% da população total que pode ser atendida, seguido pelos reatores UASB (30%) e lagoas de estabilização (15%).

Para o Estado de Santa Catarina, os reatores UASB dominam em número de sistemas implantados em todos os portes de estações considerados (52% do total). Porém, é significativo a utilização do processo de lodos ativados em estações de pequeno porte, equivalente a cerca de 33% dos sistemas implantados. Em termos de capacidade instalada, os reatores UASB respondem por cerca de 45% da população atendida, seguidos por lodos ativados (41% do total) e lagoas de estabilização (13%

do total) (CHERNICHARO *et al.*, 2018). Isso se explica devido ao fato de que as regulamentações estaduais estabelecem padrões de qualidade mais rigorosos para o lançamento de esgoto em corpos d'água em comparação com a Resolução CONAMA nº 430/2011. Portanto, é necessário que as estações de tratamento apresentem maior eficiência na remoção de matéria orgânica.

Chernicharo *et al.* (2018) conclui que, de forma geral, lodos ativados, reatores UASB e lagoas de estabilização somam 81% capacidade instalada. Para sistemas com capacidade instalada inferior a 10.000 pessoas, as seguintes tecnologias têm utilização preferencial: lagoa de estabilização (47%), reator UASB (36%), lodo ativado (11%). Para sistemas com uma população de 10.000 a 100.000 habitantes, as opções mais comuns de tratamento são: reator UASB (52%), lagoa de estabilização (29%) e lodo ativado (18%). Para sistemas com capacidade instalada superior a 100.000 habitantes, as principais opções de tratamento são: lodo ativado (44%), pré-tratamento seguido de disposição oceânica (26%) e reator UASB (22%).

É observado que em cada região há preferências distintas em relação aos sistemas de tratamento avaliados, e existe uma justificativa técnica clara para essa variação. No entanto, constatou-se que a escolha preferencial do método pode estar influenciada por grandes empresas de saneamento e pelas preferências locais embasadas no conhecimento e experiência dos projetistas.

Ademais, de acordo com o Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) no Brasil, um serviço adequado de esgotamento sanitário inclui coleta e tratamento em estação de tratamento de esgoto, ou o uso de fossa séptica seguida de pós-tratamento (BRASIL, 2013). No entanto, o sistema tradicional de coleta e tratamento de águas residuais é baseado em sistemas centralizados, que requerem grande infraestrutura e consumo energético (SUBTIL *et al.*, 2016; CAPODAGLIO *et al.*, 2017). O índice de tratamento de esgoto no Brasil em 2019 foi de 49,1%, abaixo da meta estabelecida pelo PLANSAB. As regiões Centro-Oeste e Sudeste apresentam melhores índices de tratamento, enquanto as regiões Norte e Nordeste possuem os piores (BRASIL, 2020a). Para melhorar a cobertura do esgotamento sanitário, é necessária a adoção de novas estratégias, considerando a realidade das áreas rurais, periurbanas e assentamentos informais (UNESCO PMAA, 2019; UNICEF & OMS, 2019; BRASIL, 2020b).

Ferreira *et al.* (2021) conduziram uma revisão sistemática da literatura sobre sistemas de tratamento de esgoto descentralizado (STED) no Brasil. Observou-se um

aumento na quantidade de artigos publicados a partir de 2018, representando 60% do período analisado. Não há evidências de que a aprovação dos marcos legais de saneamento tenha impactado o número de publicações. A fossa séptica, em conjunto com unidades de pós-tratamento, foi a tecnologia de tratamento mais estudada, seguida pelos reatores de lodo ativado e UASB. Entretanto, são necessários mais estudos sobre os STED que abordem áreas urbanas e periurbanas com alta densidade populacional e desafios de acesso aos sistemas tradicionais de tratamento. Os STED têm um longo percurso a percorrer antes de serem considerados uma alternativa viável aos sistemas centralizados de tratamento de águas residuais.

3.6 LEGISLAÇÕES APLICADA AO TRATAMENTO DE EFLUENTES

A avaliação das eficiências de tratamento é significativa quando comparada a valores estabelecidos pelas legislações ambientais, que são definidos em bases técnicas e representam critérios lógicos. No âmbito federal, tem-se a Resolução CONAMA nº 430/2011 que dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, além de complementar e alterar a Resolução CONAMA nº 357/2005.

Em nível estadual, existem as Resoluções CONSEMA nº 181/2021, que define diretrizes para os padrões de lançamento de efluentes, e a CONSEMA nº 182/2021, que estabelece diretrizes para os padrões de lançamento de esgotos sanitários de sistemas públicos de tratamento, operados por entes públicos ou privados. Além disso, a Portaria FATMA nº 017/2002 estabelece os limites máximos de toxicidade aguda para microcrustáceos *Daphnia magna* e bactérias bioluminescentes *Vibrio fischeri* nos efluentes de diferentes origens, sendo que para esgotos domésticos esses limites são de 1 FDd e 4 FDbI, respectivamente.

No âmbito municipal, a Orientação Técnica (OT) 09, da Vigilância Sanitária do Município de Florianópolis, define os padrões e limites para o lançamento indireto de sistemas de tratamento de esgoto sanitário em galerias de drenagem de água pluvial.

Por fim, o Enunciado 01 do IMA - Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina não estabelece limites para o lançamento de esgoto, mas define os parâmetros mínimos e frequências para o monitoramento da qualidade do tratamento de esgotos sanitários de atividades sujeitas ao licenciamento ambiental. Esse enunciado é fundamental para os sistemas de tratamento de esgoto localizados no Estado de

Santa Catarina, pois estabelece as diretrizes para análises, parâmetros a serem monitorados e periodicidade de monitoramento.

A Tabela 1 apresenta os valores limite dos parâmetros de análise exigidos pelas legislações aplicáveis a empreendimentos sujeitos ao licenciamento ambiental, que possuem sistemas de tratamento de esgoto sanitário com vazão média inferior a 1,5 L/s, como parte das medidas de controle ambiental para suas atividades.

Tabela 1 – Parâmetros de análise, frequência das análises e concentrações limites para lançamento

Parâmetro	Frequência	Resolução CONAMA nº 430/2011	Resolução CONSEMA nº 181/2011	Portaria FATMA Nº 017/02	Orientação Técnica 09
Cloro (mg/L)	Quadrimestral	-	-	-	-
DBO (mg/L)	Trimestral	120,0 ou 60% de remoção	60,0 ou 80% de remoção	-	120,0
DQO (mg/L)	Trimestral	-	-	-	-
Ecotoxicidade - <i>Daphnia magna</i> (FDd)	Anual	-	-	1	-
Ecotoxicidade - <i>Vibrio fisheri</i> (FDbI)	Anual	-	-	4	-
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 mL)	Quadrimestral	-	-	-	800
Fósforo total¹ (mg/L)	Quadrimestral	-	4,0 ou 75% de remoção	-	-
Materiais sedimentáveis (mL/L)	Quadrimestral	1,00	-	-	1,00
Nitrato (mg/L)	Quadrimestral	-	-	-	-
Nitrogênio amoniaco total² (mg/L)	Quadrimestral	20,00	-	-	-
Óleos vegetais e gorduras animais (mg/L)	Quadrimestral	50,0	30,0	-	-
pH	Quadrimestral	5,0 a 9,0	6,0 a 9,0	-	5,0 a 9,0
Temperatura (°C)	Quadrimestral	40,0	40,0	-	40,0

Fonte: Brasil (2011), Santa Catarina (2021), Santa Catarina (2002), Santa Catarina (2023) e Florianópolis (2022).

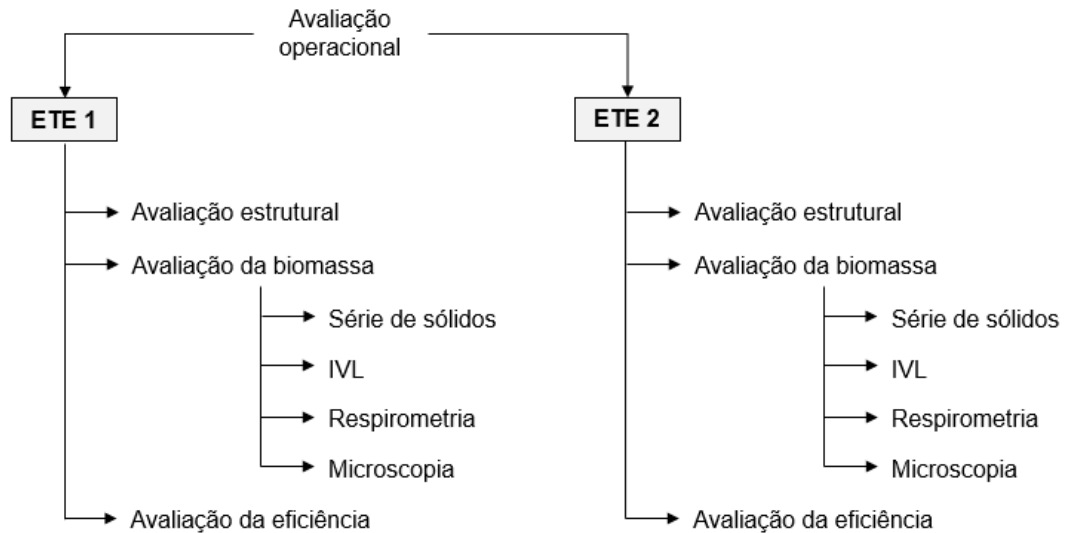
¹ Cobrado para casos em que o lançamento do efluente tratado se dá em trechos de lagoas, lagunas e estuários. Esse não é o caso das ETEs estudadas neste trabalho.

² No parágrafo 1º do artigo 21 a Resolução CONAMA nº 430/2011 diz: "as condições e padrões de lançamento relacionados na Seção II, art. 16, incisos I e II desta Resolução, poderão ser aplicáveis aos sistemas de tratamento de esgotos sanitários, a critério do órgão ambiental competente, em função das características locais, não sendo exigível o padrão de nitrogênio amoniaco total."

4 METODOLOGIA

O fluxograma de realização deste trabalho está apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Fluxograma das atividades realizadas no presente trabalho



Fonte: De autoria própria

As avaliações estruturais, de biomassa e de eficiência de tratamento foram realizadas separadamente para cada ETE, a fim de facilitar a organização dos resultados. No entanto, devido à similaridade na operação das duas ETEs, a avaliação operacional é apresentada de forma conjunta neste trabalho. A avaliação estrutural abrange a comparação entre o que foi projetado e o que foi executado, além de comparações com a literatura para avaliar a conformidade do projeto.

Na primeira etapa do trabalho foram coletados dados em campo sobre a localização e situação dos sistemas de tratamento de esgoto, além de comparar a execução do sistema com o projeto. Também foram analisados dados secundários obtidos em bases de dados dos condomínios, referentes aos parâmetros de avaliação de desempenho (DBO, fósforo total e nitrogênio amoniacal), incluindo resultados de análises das amostras do esgoto bruto e tratado da ETE, realizadas bimestralmente por laboratório terceirizado. Essas análises foram realizadas para confrontar os resultados de concentração de saída e eficiência de remoção com as legislações ambientais vigentes.

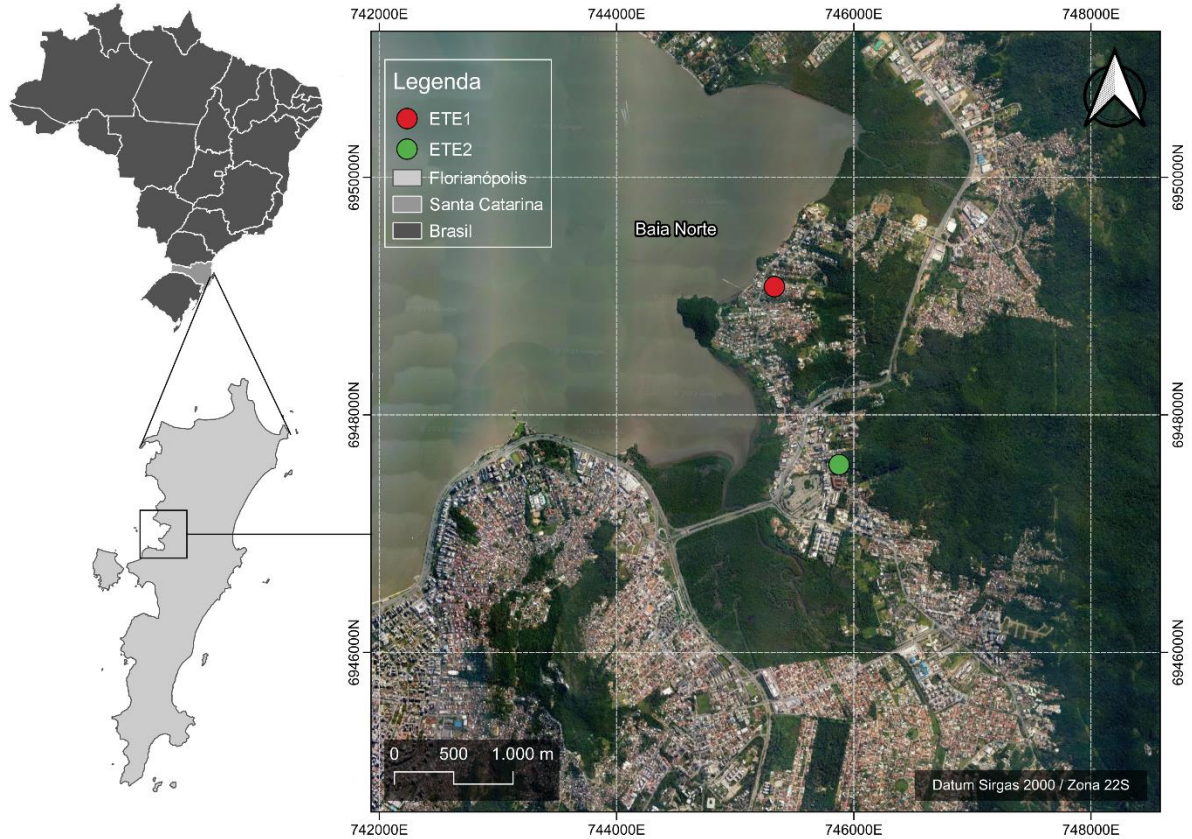
Na segunda parte, foram realizadas visitas para coletar amostras do reator aeróbio para análise da série dos sólidos, índice volumétrico de lodo, análise microscópica e respirometria.

A análise dos sólidos permite verificar se a concentração de biomassa é adequada para o tratamento biológico e se o reciclo e descarte de lodo estão sendo realizados de maneira adequada. A análise microscópica possibilitou observar organismos presentes nos esgotos, indicando estágios de tratamento e a estrutura do floco biológico. Por fim, a Taxa de Consumo de Oxigênio (TCO) endógena, autotrófica e heterotrófica foi avaliada através de experimento em bancada pelo método respirométrico, que permite avaliar o estado metabólico dos organismos responsáveis pelo tratamento.

4.1 LOCAL DE ESTUDO

Foram selecionadas duas ETE projetadas para atender as demandas de dois condomínios residenciais localizados na região central do município de Florianópolis. As estações serão denominadas como "ETE 1" e "ETE 2" com o objetivo de preservar a privacidade dos empreendimentos. Na Figura 9, é possível visualizar a localização aproximada de ambos os sistemas de tratamento.

Figura 9 – Localização das estações de tratamento de esgoto de estudo



Fonte: De autoria própria

4.2 AMOSTRAGEM E PONTOS DE COLETA

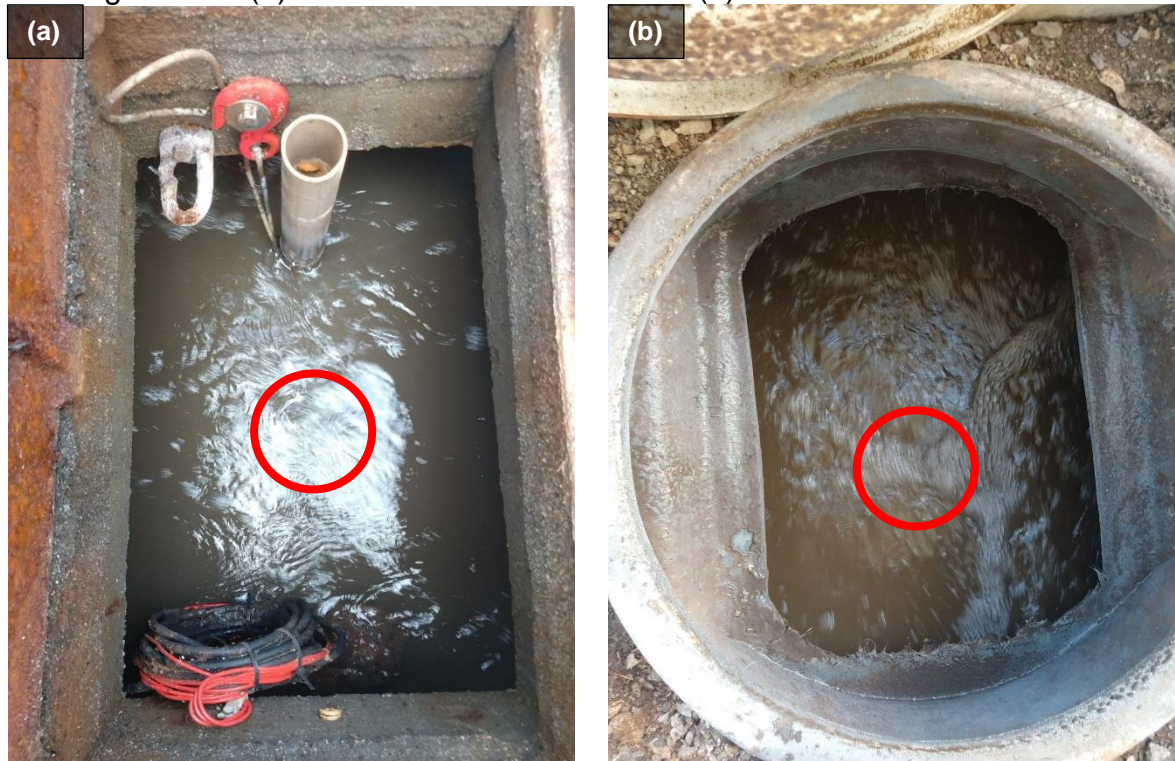
Com o objetivo de garantir a confiabilidade das amostras, foram aplicados procedimentos, normas e cuidados específicos durante a coleta dos parâmetros analisados no Laboratório de Efluentes Líquidos e Gasosos (LABEFLU) e de Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), ambos pertencentes à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Tais práticas seguiram as orientações descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005) e na ABNT NBR 9898:2018, que estabelece os procedimentos para a amostragem, preservação e análise físico-química de efluentes líquidos e corpos receptores.

Os pontos de coleta de amostras para análise foram nos reatores aeróbios de cada sistema e, para manter um padrão consistente nas amostras, todas as coletas foram realizadas no mesmo ponto, cerca de 1 metro abaixo da superfície da água. Além disso, a magnitude da estratificação do oxigênio dissolvido depende do tipo de aerador e da configuração do reator, bem como da taxa de carga orgânica (TCO) e

da intensidade de mistura (SANTOS *et al.*, 2017). Na ETE 1, que utiliza um aerador com tubo de Venturi, presume-se que há uma estratificação da concentração de oxigênio dissolvido. Portanto, a coleta de amostras foi realizada próxima ao ponto de aeração, uma vez que o ponto crítico com menor concentração de oxigênio dissolvido está mais afastado. Na ETE 2, o sistema de aeração é composto por membranas com difusores, o que mantém a concentração de oxigênio dissolvido uniforme em todo o tanque.

Os pontos de coleta estão demonstrados na Figura 10.

Figura 10 – (a) Ponto de coleta da ETE 1 e (b) Ponto de coleta da ETE 2



Fonte: De autoria própria

As análises de respirometria e microscopia foram realizadas no LABEFLU. Manteve-se um espaçamento de aproximadamente 15 dias entre as análises. Ademais, as análises foram realizadas após 24 horas das coletas, a fim de que todo material orgânico fosse degradado até a análise de respirometria, permitindo obter com fidedignidade a taxa de consumo de oxigênio endógena. No Quadro 4 é mostrado os dias das coletas, bem como das análises. Apenas a primeira análise não foi possível realizar após 24 horas da coleta por motivos de logística.

Quadro 4 – Datas das coletas e análises

Data da coleta das amostras	Data das análises	Observação
26/04/2023	26/04/2023	-
10/05/2023	11/05/2023	Amostra foi deixada aerando 24 horas antes de começar as análises.
25/05/2023	26/05/2023	Amostra foi deixada aerando 24 horas antes de começar as análises.
12/06/2023	13/06/2023	Amostra foi deixada aerando 24 horas antes de começar as análises.

Fonte: De autoria própria

4.3 SÉRIE DE SÓLIDOS

Foram realizadas análises de sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (STV), sólidos suspensos (SS) e sólidos suspensos voláteis (SSV – biomassa) de acordo com a metodologia pré-estabelecida pelo Laboratório Integrado de Meio Ambiente – LIMA da UFSC e de acordo com acordo *Standard Methods* (APHA, 2005).

4.4 TESTE DE ÍNDICE VOLUMÉTRICO DE LODO (IVL)

O IVL é a medida do volume ocupado pelo lodo após 30 minutos de sedimentação, dividido pela massa de sólidos presentes no reator, conforme expresso na Equação 3.

$$IVL = \frac{SSed_{30} \times 1000}{SST} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

IVL: Índice Volumétrico de Lodo [mL/g];

SSed₃₀: Sólidos sedimentáveis em 30 minutos [mL/L];

SST: Sólidos suspensos totais no licor misto [mg/L].

Os Sólidos Sedimentáveis (SSed) são determinados de acordo *Standard Methods* (APHA, 2005) em proveta graduada de 1.000 mL durante 30 minutos, com a amostra do licor misto do tanque de aeração.

4.5 TESTE DE RESPIROMETRIA

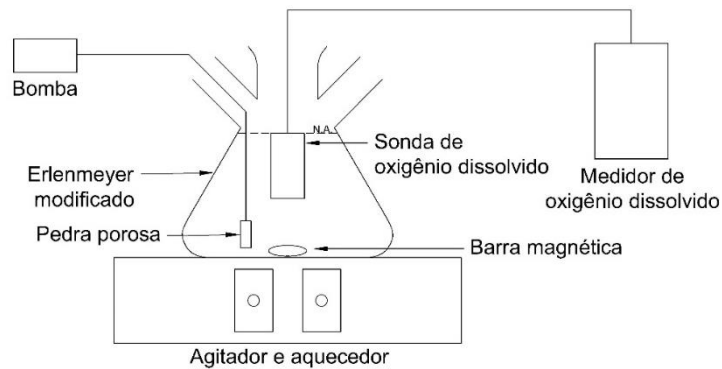
O experimento seguiu a metodologia descrita por Schmidell (2001). Para determinar a velocidade específica de respiração (QO_2) é medida através do teste de respirometria do lodo a taxa de diminuição da concentração de oxigênio dissolvido (OD) no efluente. Já o teste de divisão da biomassa ativa foi capaz de caracterizar tanto o comportamento quanto a composição microbiológica do lodo através da respiração exógena e endógena.

Para esse fim, bactérias autotróficas nitrificantes podem ser identificadas através da adição de uma solução de cloreto de amônio, que é um substrato específico para essas bactérias, especialmente as *Nitrossomonas*, que convertem amônia (NH_3) em nitrato (NO_3^-) por oxidação. Por outro lado, a adição de *Allylthiourea* (ATU), que inibe as *Nitrossomonas*, e glicose, estimula as bactérias heterotróficas do lodo a consumir oxigênio na respiração celular. Isso permite a determinação da velocidade de respiração autótrofa ($(QO_2X)_A$) e heterótrofa do lodo ($(QO_2X)_H$) e a obtenção da concentração de biomassa ativa autotrófica (X_A) e heterotrófica (X_H).

O lodo utilizado no experimento foi aerado durante 24 horas a temperatura ambiente para degradar eventuais matérias orgânicas e nutrientes e atingir a estabilização da atividade. Os reatores utilizados para armazenar os efluentes até a fase de análise foram duas garrafas de água de 5 litros, preenchidas com 3 litros de licor misto. A aeração foi realizada através de uma pequena bomba de ar, que injetava bolhas de ar por meio de uma pedra porosa.

Na Figura 11 é possível observar um esquema do modelo de bancada utilizado para a análise de respirometria.

Figura 11 – Esquema de montagem para análise respirométrica



Fonte: De autoria própria

Para o experimento, a amostra de licor misto foi aerada por 24 horas e após isso, em um Erlenmeyer modificado foi adicionado 940 mL de amostra. O licor misto foi submetido a aeração e agitação constantes com uma bomba de aquário e um agitador magnético. A sonda multiparâmetro YSI 1020 permaneceu constantemente em contato com o efluente. Após desligar a aeração, uma leve agitação foi mantida para impedir a sedimentação da biomassa. Os dados de OD foram coletados a cada 5 ou 10 segundos – a depender da velocidade de consumo de oxigênio – para formar a curva de consumo de OD. Esta é a respiração endógena.

Para realizar a divisão da biomassa ativa, religou-se o aerador até o licor misto atingir a saturação de OD. Em seguida, foram adicionados 40 mL de NH_4Cl e a aeração foi interrompida para permitir a leitura do consumo de OD, que só é realizada após o consumo de cerca de, em média, 2 mgO_2 . Para obter $(\text{QO}_2\text{X})_A$ - respiração autótrofa –, a inclinação da reta de melhor ajuste (regressão linear) foi calculada. Após a leitura, a aeração foi retomada até o ponto de saturação e então adicionou-se 40 mL de solução de ATU e 40 mL de solução de glicose. A aeração foi desligada novamente e iniciou-se a leitura do consumo de OD para a determinação de $(\text{QO}_2\text{X})_H$ – respiração heterótrofa.

A velocidade específica de respiração máxima do lodo foi então determinada usando a Equação 4:

$$\text{QO}_2 = \frac{1}{X} \frac{d\text{O}_2}{dt} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

QO_2 é a velocidade específica de respiração [$\text{mgO}_2/\text{g}_{\text{cel.}}\text{h}$]

X é a concentração celular [g_{cel}.h/m³]

$\frac{dO_2}{dt}$ é a variação de oxigênio ao longo do tempo [mgO₂/m³.h]

Respectivamente, a Equação 5 e a Equação 6 apresentam os cálculos realizados para obter a concentração de biomassa ativa autotrófica e de biomassa ativa heterotrófica (HENZE *et al.*, 1987).

$$X_A = \frac{1}{\mu_{A \text{ máx}}} \cdot \frac{Y_A}{4,57 - Y_A} \cdot (QO_2X)_{A \text{ máx}} \quad \text{Equação 5}$$

$$X_H = \frac{1}{\mu_{H \text{ máx}}} \cdot \frac{Y_H}{1 - Y_H} \cdot (QO_2X)_{H \text{ máx}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

X_A é a concentração de biomassa ativa autotrófica [gDQO/L]

X_H a concentração de biomassa ativa heterotrófica [gDQO/L]

$\mu_{A \text{ máx}}$ é a taxa de crescimento autotrófica = 0,75 [d⁻¹];

$\mu_{H \text{ máx}}$ é a taxa de crescimento heterotrófico = 6,0 [d⁻¹];

Y_A é a taxa de conversão autotrófica = 0,24 [gDQO/gDQO_{oxidado}];

Y_H é a taxa de conversão heterotrófica = 0,63 [gDQO/gDQO_{oxidado}];

$(QO_2X)_{A \text{ máx}}$ é a velocidade máxima de consumo de oxigênio da biomassa autotrófica [mgO₂/L.h];

$(QO_2X)_{H \text{ máx}}$ é a velocidade máxima de consumo de oxigênio da biomassa heterotrófica [mgO₂/L.h].

4.6 ANÁLISE MICROSCÓPICA DO LODO

A caracterização microscópica da biomassa foi realizada utilizando um microscópio Olympus BX40F-3 e um microscópio biológico invertido INV100-FL da Bel Equipamentos. As imagens foram capturadas por meio de uma câmera específica para microscopia. O microscópio invertido foi utilizado para observar e caracterizar a estrutura do floco com ampliação de 40 vezes. O microscópio óptico Olympus BX40F-3 foi utilizado para o mesmo propósito, além de permitir a observação da composição de microrganismos da biomassa em estudo.

As amostras foram transferidas para um béquer e aguardou-se um breve período de sedimentação do lodo para possibilitar a coleta da amostra utilizando uma pipeta Pasteur, a fim de obter a máxima quantidade de lodo possível. Considerando que a quantidade de amostra requerida para análise microscópica é mínima e para permitir a observação do maior número possível de microrganismos presentes no lodo das estações de tratamento, todas as análises foram realizadas em triplicata.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 AVALIAÇÃO OPERACIONAL DAS ETE 1 E ETE 2

Devido à similaridade na operação das ETE 1 e ETE 2, a avaliação operacional é abordada em um único item, ao invés de ser tratada separadamente para cada uma delas. Assim, ambas as ETE são operadas por uma empresa terceirizada. A rotina operacional consiste em uma visita semanal com duração aproximada de 20 minutos para realizar uma inspeção visual do funcionamento global dos sistemas e medir parâmetros de controle do processo no efluente tratado da ETE, tais como OD, pH, temperatura, aspecto do efluente e sólidos sedimentáveis. Não é realizada a medição de parâmetros de controle de processo no reator aeróbio, tal como SS, SSV, NO_3^- , IVL, entre outros. Além disso, é adicionado hipoclorito de cálcio, também conhecido como "pastilhas de cloro", ao tanque de desinfecção para eliminar ou inativar microrganismos patogênicos.

Ademais, são realizados testes nos componentes do quadro de comando das ETE a fim de observar a operacionalidade dos equipamentos, bem como a medição de corrente elétrica com volt-amperímetro nos equipamentos (geralmente, referindo-se às motobombas) que compõem o sistema. Caso algum equipamento apresente diferença significativa de corrente elétrica entre as fases ou corrente elétrica que diverge da corrente nominal, é realizada a inversão das fases, ou seja, a rotação do equipamento é invertida. Em algumas situações, quando o problema é causado por resíduos sólidos, a motobomba volta a operar normalmente após o desprendimento dos resíduos do equipamento. No entanto, se o problema persistir, o responsável pelo empreendimento é contatado para acionar uma empresa especializada e realizar a manutenção corretiva do equipamento.

A falta de controle de variáveis como vazão de entrada, vazão de recirculação do lodo e da concentração de biomassa no reator impede a obtenção de alguns parâmetros de controle, como a idade do lodo e o controle da carga do lodo (relação alimento/microrganismo). A medição de vazão contribui para a avaliação do desempenho da ETE e a tomada de decisões para otimização do processo de tratamento.

Além disso, não é possível fazer o controle remoto do sistema, uma vez que não há um sistema de telemetria nessas estações de tratamento de esgoto. A

telemetria é utilizada para o monitoramento de vazão, níveis de tanques, controle de sistemas e equipamentos, detecção de falhas e otimização do processo de tratamento em uma ETE. Resumidamente, ela permite um monitoramento contínuo e preciso do processo de tratamento, possibilitando a tomada de decisões mais eficientes, controle remoto dos sistemas e melhoria geral da operação da estação.

Outro aspecto importante são as coletas de amostras do esgoto bruto para análises, que são realizadas no tanque de retenção de sólidos da ETE 1 e na estação elevatória de esgoto bruto da ETE 2. Coletas em tanques onde há acúmulo de lodo podem descaracterizar a amostra, uma vez que os valores dos parâmetros de entradas ficam superestimados. De acordo com o Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras da CETESB (CETESB, 2011), a avaliação da eficiência de uma unidade de tratamento requer a coleta de amostras do afluente (esgoto antes de entrar no sistema) e do efluente (esgoto após passar pelo sistema).

Por fim, a operação de sistemas de tratamento de esgoto em condomínio residenciais enfrenta a dependência de terceiros para manutenção e solução de problemas. O problema deve ser relatado ao síndico responsável pelo empreendimento e este deve entrar em contato com uma empresa especializada, seja para conserto de equipamentos, conserto de infiltração ou mesmo limpeza do sistema com caminhão auto vácuo (limpa fossa). Por vezes esse processo é oneroso e demorado, afetando a eficiência de tratamento do sistema.

No Quadro 5 é possível observar, em síntese, o que foi diagnosticado e medidas corretivas possíveis de serem adotadas para melhorias na operação das ETE 1 e ETE 2.

Quadro 5 – Avaliação e medidas corretivas para operação das ETE 1 e ETE 2

Unidade do sistema	Operação atual	Problema observado	Medida corretiva
Tanque de retenção de sólidos (ETE 1) / Elevatória de esgoto bruto (ETE 2)	Coleta para análise é feita no tanque de retenção de sólidos (para a ETE 1) / Coleta para análise é feita na elevatória de esgoto bruto (para a ETE 2)	Parâmetros de entrada superestimados	Padronização da coleta antes do esgoto adentrar e acumular lodo nos tanques de retenção de sólidos ou elevatória de esgoto bruto
Motobombas	-	Ausência de controle da vazão	Instalar medidor de vazão automático
Quadro de comandos	Visita <i>in loco</i> para verificar funcionamento	Ausência de obtenção de dados em tempo real	Instalar sistema de telemetria
	Medição de corrente elétrica e inversão de fases	-	-
Gestão de informações da ETE	Comunicação entre síndico e prestadores de serviço	Demora na comunicação e execução dos serviços	Sistema de gestão de informação online
Reator biológico	-	Ausência de acompanhamento de parâmetros de controle de processo na rotina operacional	Adotar análises de parâmetro de controle de processo, tal como levantamento de sólidos no reator aeróbio
	-	Ausência do monitoramento de nitratos para validar a desnitrificação do sistema	Monitorar o parâmetro nitrato com sondas específicas ou análises de laboratório

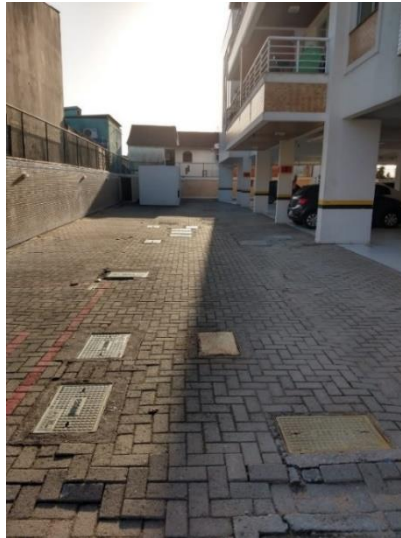
Fonte: De autoria própria

5.2 AVALIAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO 1

5.2.1 Avaliação estrutural da ETE 1

A ETE 1 foi construída abaixo do nível do solo por motivos de segurança para os moradores locais, bem como para aumentar o espaço útil de circulação do condomínio. É possível observar na Figura 12 que a ETE foi instalada na área de estacionamento do condomínio, onde há a movimentação de veículos sobre a estrutura do sistema.

Figura 12 – Vista geral da ETE 1



Fonte: De autoria própria

A ETE 1, de acordo com o seu projeto, é do tipo lodos ativados convencional e de fluxo contínuo, sendo responsável por tratar somente esgoto doméstico, uma vez que está situada em lote de condomínio exclusivamente residencial. Sendo assim, não há nenhuma etapa de tratamento físico-químico.

A estação de tratamento foi projetada para atender uma população final de 216 contribuintes. Os parâmetros de projetos adotados e encontrados, segundo o projeto da ETE 1, estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados de projeto da ETE 1

Variável		Valor adotado ou encontrado	Unidade
População	C	216	hab.
Geração per capta de esgoto	p	0,16	m ³ /hab.d
Vazão diária	Q	46,46	m ³ /d
	Qh	2,00	m ³ /h
Vazão horária de pico	Qh	2,00	m ³ /h
Período de contribuição	c	24,00	h/d
DBO de entrada	So	320,00	mg/L
DBO de saída	Se	5,00	mg/L
Carga orgânica per capta	Kc	0,05	kg/hab.dia
Carga orgânica bruta	Ko	11,66	kg/dia
Temperatura	T	20 – 36	°C
SSVTA	X	3.000	mg/L
SSV no reciclo do lodo	Xr	6.000	mg/L
Tempo de retenção celular	θ_c	15	dias
	Ks	60,00	mg/L
Coefficientes cinéticos	Y	0,60	mg.SSV/mgDBO
	Kd	0,11	d ⁻¹
	fb'	0,61	gSSb/gSSV

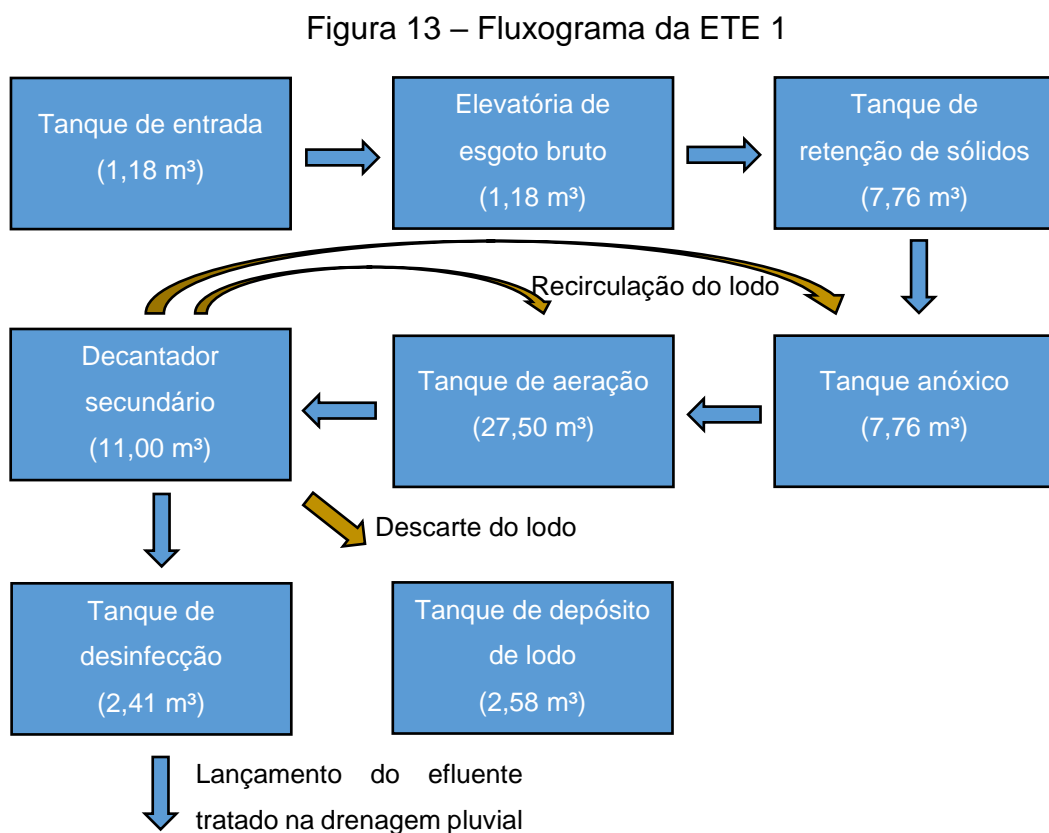
Fonte: Projeto da ETE 1

De acordo com o projeto da ETE 1, ela foi dimensionada com uma idade de lodo de 15 dias, valor superior àquele indicado por Sperling (2016a) para um sistema convencional (4 a 10 dias), porém, dentro da faixa aceita por Jordão e Pessoa (1995) para a idade do lodo em sistemas convencionais (4 a 15 dias).

Para os cálculos de vazão foram considerados o coeficiente de variação diária $K1 = 1,2$ e coeficiente de variação horária $K2 = 1,5$. Além disso, segundo o autor do projeto, os dados adotados para a biomassa no tanque de aerção, bem como reciclo do lodo foram retirados de dados experimentais da CASAN.

A planta baixa e o perfil hidráulico da ETE 1, retirados do projeto, estão apresentados no Anexo A.

O fluxograma de processo de tratamento da ETE 1 está mostrado na Figura 13



Fonte: De autoria própria

Todo o sistema foi construído utilizando estruturas de concreto armado. As aberturas de acesso foram estrategicamente posicionadas para possibilitar a inspeção e manutenção dos equipamentos e componentes hidráulicos pertinentes, como as motobombas e calhas de coleta de água clarificada presentes no decantador.

O detalhamento de cada processo unitário da ETE 1, bem como o levantamento em campo com imagens das unidades é apresentado a seguir.

5.2.1.1 *Tanque de entrada e elevatória de esgoto*

O tanque de entrada foi construído com o objetivo de reter sólidos grosseiros antes de entrar na estação elevatória de esgoto bruto, a fim de evitar danos aos equipamentos de recalque causados por esses sólidos. Este tanque tem volume útil de 1,18 m³. Apesar de ter sido projetado com a finalidade de retenção de sólidos grosseiros, observa-se que o tanque de entrada não está equipado com cesto ou gradeamento. A ausência desses dispositivos pode comprometer o sistema ao permitir a passagem de resíduos sólidos para as etapas subsequentes, especialmente para os tanques que contêm equipamentos mecânicos suscetíveis a danos causados por esses resíduos. Recomenda-se a instalação de cesto ou gradeamento como medidas preventivas para evitar tais problemas operacionais e danos aos equipamentos.

A elevatória de esgoto bruto está relacionada com a cota geométrica negativa no sentido de fluxo das peças hidrossanitárias à ETE. Assim faz-se necessário a execução de uma estação elevatória de esgoto bruto (EEE), a fim de recalcar o esgoto dentro deste tanque. Este tanque tem volume útil de 1,18 m³.

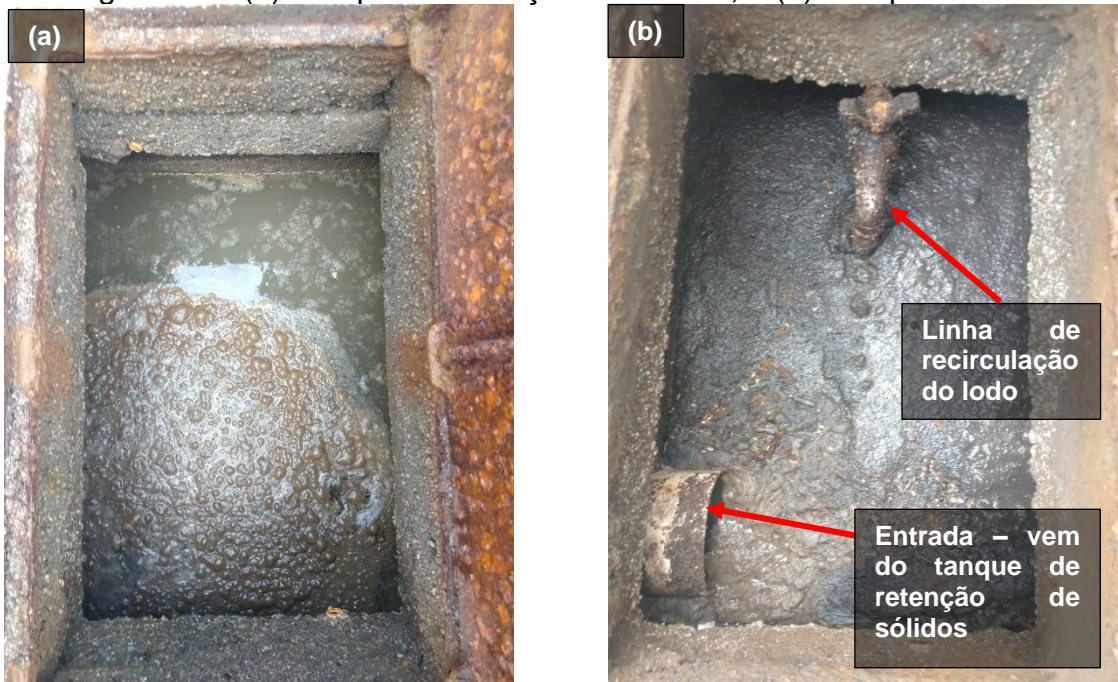
Na Figura 14, são apresentados o tanque de entrada e a elevatória de esgoto bruto, enquanto a Figura 15 oferece informações detalhadas sobre o corte transversal do projeto destes tanques.

estranhos ao efluente retidos neste tanque. Em tese, substitui o tradicional gradeamento/desarenador utilizado em sistemas de tratamento de maior porte. Este tanque tem volume útil de 7,76 m³.

O tanque anóxico seguido do tanque aeróbio tem como finalidade promover a nitrificação/desnitrificação. A nitrificação ocorre na zona aeróbia, conduzindo à formação de nitratos. Os nitratos são direcionados à zona anóxica, por meio de recirculação interna. Na zona anóxica, os nitratos são convertidos a nitrogênio gasoso, escapando para a atmosfera. No entanto, neste caso, não havendo a recirculação interna, apenas a recirculação do lodo do decantador secundário, a desnitrificação ocorre principalmente no decantador secundário, e as bolhas de nitrogênio gasoso geradas no processo de desnitrificação levam o lodo para a superfície do decantador secundário, comprometendo a qualidade do efluente tratado. A esse processo indesejado dá-se o nome de flotação do lodo. Este tanque tem volume de 7,76 m³. No caso deste tanque, sugere-se que seja realizada a modificação do sistema para permitir a recirculação interna de nitratos do tanque de aeração ao tanque anóxico, além da recirculação do lodo do decantador secundário, para melhorar o processo de desnitrificação e evitar o envio de nitratos ao decantador secundário, ocasionando a flotação de lodo.

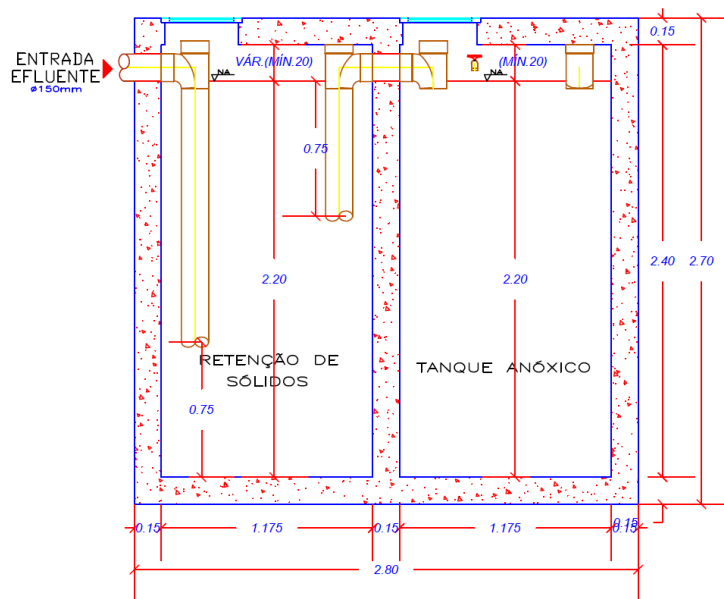
Na Figura 16, são apresentados o tanque de retenção de sólidos e o tanque anóxico, enquanto a Figura 17 fornece informações detalhadas sobre o corte transversal do projeto desses tanques.

Figura 16 – (a) Tanque de retenção de sólidos; e (b) Tanque anóxico



Fonte: De autoria própria

Figura 17 – Corte de projeto: tanque de retenção de sólidos e tanque anóxico



Fonte: Projeto da ETE 1

5.2.1.3 Tanque de aeração

Esta unidade é responsável pela formação dos microrganismos ativos, local onde são fornecidas as condições ideais para que os microrganismos responsáveis pela degradação biológica se desenvolvam e cumpram sua função. É fornecido

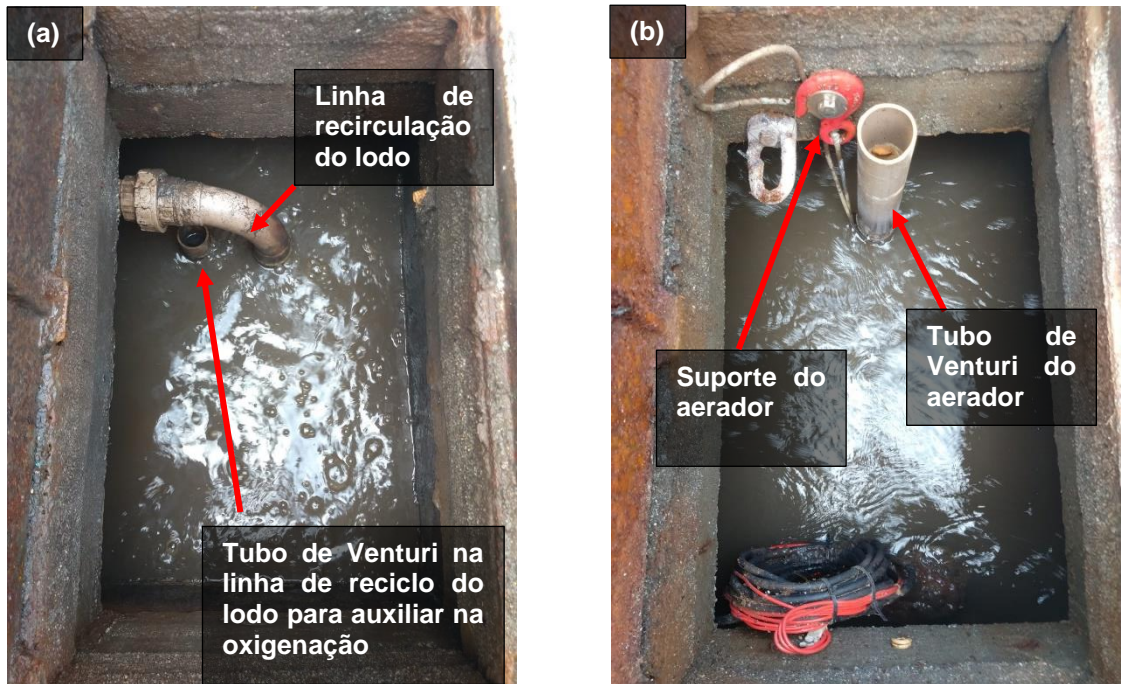
oxigênio, micro e macro nutrientes e um tempo de detenção ideal, para que todos os processos ocorram eficientemente. Este tanque possui volume útil de 27,50 m³.

Percebe-se que o aerador utilizado no sistema consiste em uma motobomba adaptada com tubo de Venturi. Embora esse tipo de aerador proporcione uma boa homogeneização do licor misto, é importante ressaltar que ele também pode gerar turbulência excessiva, resultando na quebra dos flocos de lodo ativado. Além disso, é observado que a presença de bolhas de ar no tanque de aeração é limitada (Figura 18), o que pode indicar uma baixa taxa de transferência de oxigênio por parte deste aerador para o reator biológico, assim como problemas de distribuição do ar. É bastante comum que esse tipo de equipamento apresente defeitos, como obstruções no rotor da motobomba ou no tubo de Venturi, resultando em perda de eficiência ou até mesmo danos ao equipamento, como a queima do motor.

Por outro lado, os sopradores injetam bolhas de ar finas em quase todo o sistema, proporcionando uma maior área de contato entre o ar e o licor misto. Eles causam menos turbulência e não apresentam problemas de entupimentos, pois são instalados na parte externa do reator biológico. Os sopradores são conhecidos por sua eficiência na transferência de oxigênio e por garantirem uma distribuição mais uniforme do ar, contribuindo para um melhor desempenho do sistema de aeração. Portanto, sugere-se a substituição do aerador com tubo de Venturi por um soprador.

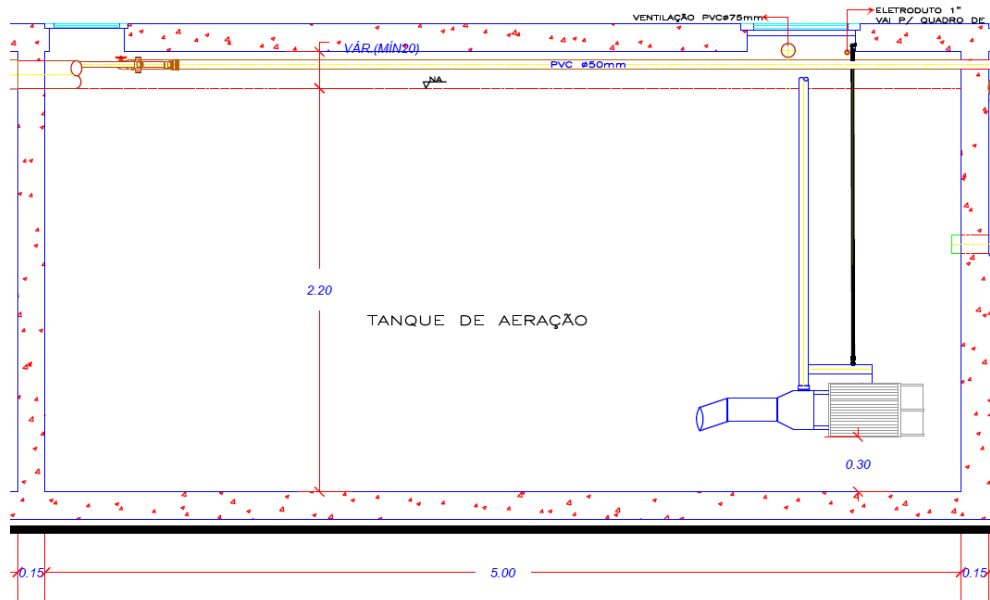
Na Figura 18, é apresentado o tanque de aeração, enquanto a Figura 19 fornece informações detalhadas sobre o corte transversal do projeto desse tanque.

Figura 18 – (a) Tanque de aeração com acesso ao registro da linha de recirculação do lodo; e (b) Tanque de aeração com acesso ao aerador/tubo de Venturi



Fonte: De autoria própria

Figura 19 – Corte de projeto: tanque de aeração



Fonte: Projeto da ETE 1

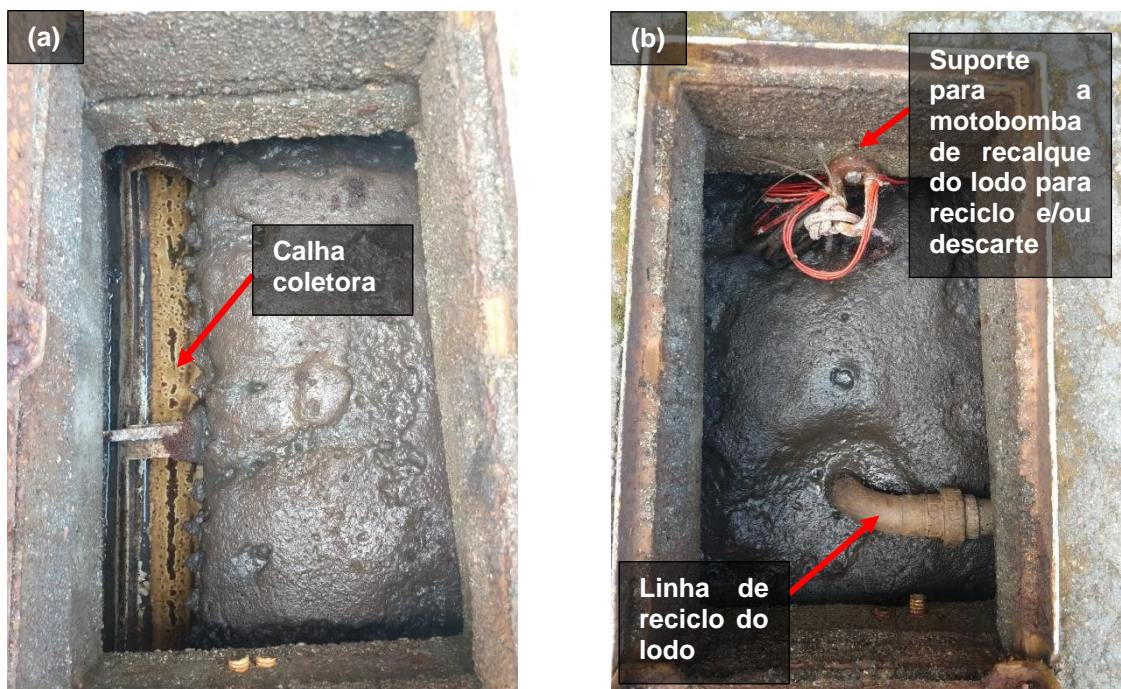
5.2.1.4 Decantador secundário

O decantador secundário tem a função de separar os sólidos suspensos do efluente tratado. Estes sólidos são formados pelos microrganismos ativos no tanque

de aeração e dos inativos. Portanto, com sua sedimentação, eles retornam ao reator aeróbio e o líquido clarificado segue superficialmente ao destino final. O meio utilizado para efetuar o reciclo do lodo é forçado por motobomba submersível situada no fundo da unidade de decantação, que direciona o lodo sedimentado de volta ao tanque de aeração. Esta unidade possui volume útil de aproximadamente 11,00 m³. Na primeira vistoria para registros fotográficos do sistema, foi possível observar uma camada espessa de lodo ascendente no decantador secundário, com bolhas, o que indica que está ocorrendo desnitrificação nesta unidade.

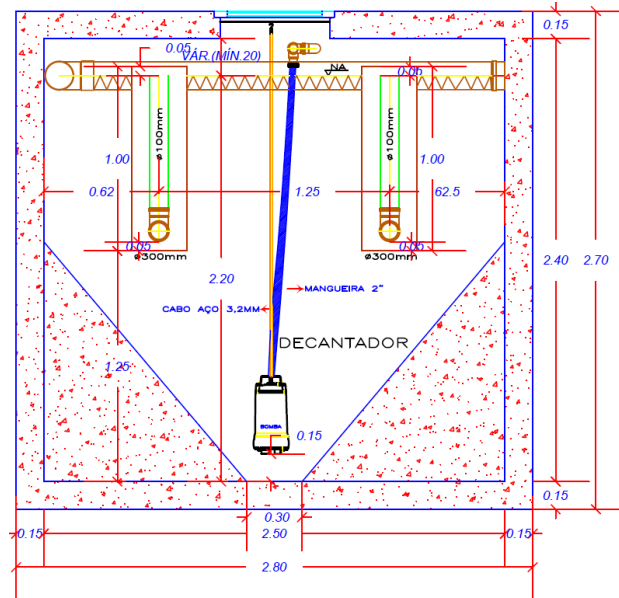
Na Figura 20, é apresentado o decantador secundário, enquanto a Figura 21 fornece informações detalhadas sobre o corte transversal do projeto desse tanque.

Figura 20 – (a) Decantador com acesso à calha coletora; e (b) Decantador com acesso à tubulação da linha de recirculação/descarte do lodo



Fonte: De autoria própria

Figura 21 – Corte de projeto: decantador



Fonte: Projeto da ETE 1

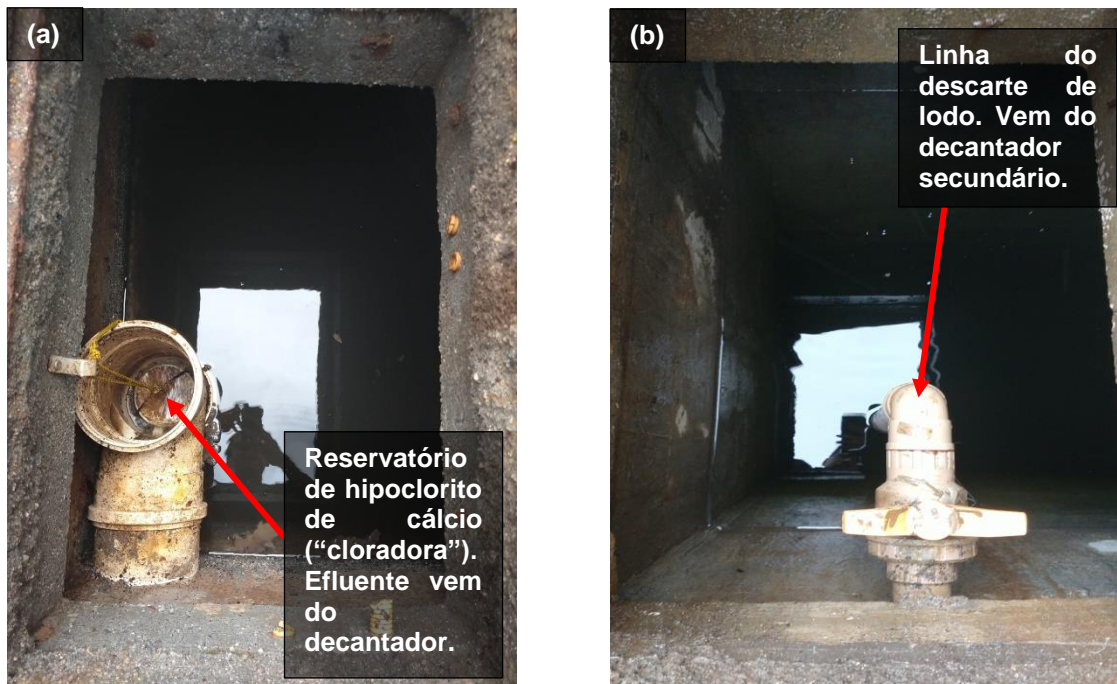
5.2.1.5 Tanque de desinfecção e tanque de depósito de lodo

O tanque de desinfecção trata-se de tanque, onde, através de tempo de contato de 45 minutos para esta ETE em específico, faz-se a eliminação ou inativação dos coliformes presentes no efluente já tratado. Para tal finalidade são utilizadas pastilhas de cloreto de cálcio, de 200 g cada, acondicionadas em uma “grelha”, por onde passa o efluente tratado que sai do decantador. Este tanque tem volume útil de 2,41 m³.

O lodo produzido no sistema de tratamento adotado, ou seja, lodo ativado convencional, segue para o decantador e retorna quase em sua totalidade para o tanque de aeração. Neste sistema de tratamento é comum ser gerado um excesso de lodo, que deve ser descartado. Para tanto foi concebida uma unidade de descarte de depósito de lodo excedente. A própria motobomba que executa o retorno do lodo para o tanque de aeração, recalca esse excesso para a unidade de lodo descartado através de uma inversão de registros. O lodo em excesso fica nesta unidade até que a capacidade volumétrica dela seja totalmente consumida. Neste momento ele deve ser retirado por caminhão auto vácuo. Este tanque tem volume útil de 2,58 m³.

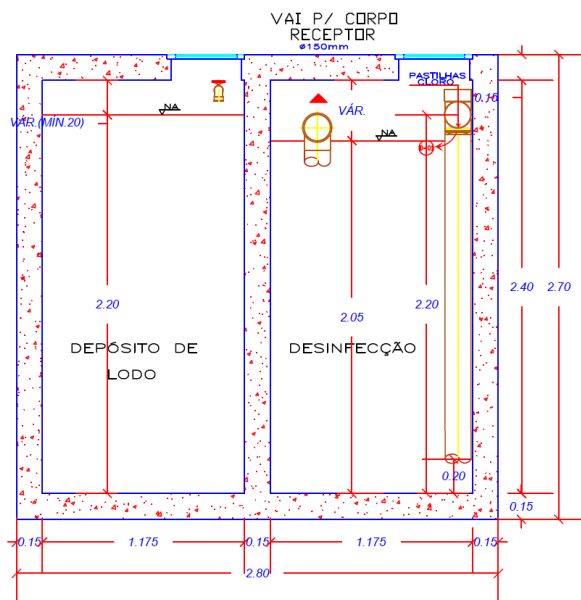
Na Figura 22, são apresentados o tanque de desinfecção e tanque de depósito de lodo, enquanto a Figura 23 fornece informações detalhadas sobre o corte transversal do projeto desses tanques.

Figura 22 – (a) Tanque de desinfecção (contato); e (b) Tanque de depósito de lodo



Fonte: De autoria própria

Figura 23 – Corte de projeto: tanque de desinfecção e tanque para depósito de lodo



Fonte: Projeto da ETE 1

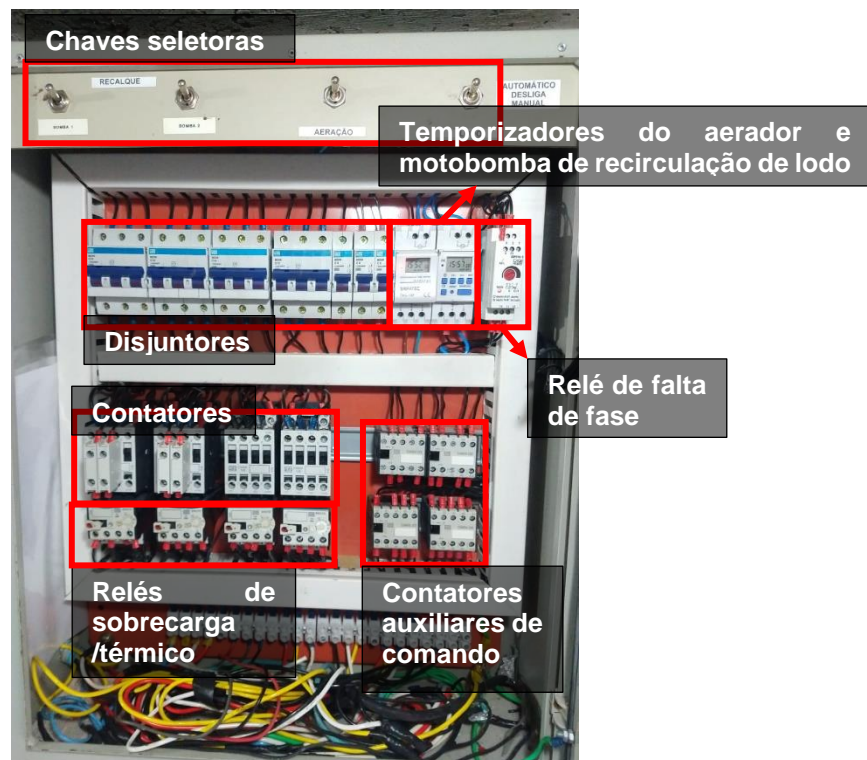
5.2.1.6 Sistema eletromecânico

Os equipamentos presentes neste sistema de tratamento são:

- Duas motobombas – ABS Sulzer UNI 300T de 0,5CV e 380V – para recalque do esgoto bruto;
- Uma motobomba de 2 CV, cujo modelo não foi detalhado no projeto, é utilizada como aerador; e
- Uma motobomba – ABS Sulzer UNI 300T de 0,5CV e 380V – para a recirculação e descarte do lodo, com registros que direcionam o lodo para o tanque de aeração ou para o tanque anóxico.

Ademais, o quadro de comandos da ETE 1 é responsável por abrigar os componentes elétricos, como disjuntores, relés, contatores, chaves seletoras, entre outros, que permitem a operação, controle e proteção dos equipamentos da estação de tratamento. Na Figura 24 é possível observar o painel de comandos da ETE 1.

Figura 24 – Quadro de comandos da ETE 1



Fonte: De autoria própria

Ao verificar o painel de comandos da ETE, observou-se que os temporizadores indicados na Figura 24 permitiam apenas até 14 programações em menos de 24 horas, o que significa que o equipamento não pode ser ligado mais de 14 vezes por dia. Isso resulta em tempos de liga-desliga prolongados. Se o equipamento permanecer ligado por muito tempo, a taxa de recirculação será muito

alta, podendo causar uma perda significativa de sólidos no sistema. Por outro lado, se a taxa de recirculação for muito baixa, o lodo biológico não receberá oxigênio e causará danos ao tratamento, além de ocorrer a desnitrificação no decantador secundário e a flotação do lodo. A medida corretiva para este problema é a troca desses temporizadores que permitem poucos ciclos para temporizadores digitais que permitam mais programações.

O retorno do lodo é temporizado porque as motobombas disponíveis no mercado são mais potentes do que o necessário para ETE de pequeno porte (considerado neste trabalho ETE de pequeno porte aquelas com vazão igual ou inferior a 5,0 L/s), podendo apresentar vazões de até 15 vezes a vazão média do esgoto bruto entrando no sistema. Por esse motivo, é realizado um cálculo de retorno de lodo com base na vazão nominal do equipamento para que a taxa de recirculação seja semelhante àquela considerada no projeto. Nesse caso, a vazão média do sistema é de 2,00 m³/h, considerando $R = 1$ (projeto) e a vazão Q_b da motobomba de 12 m³/h, o equipamento deve ficar ligado por 10 minutos a cada 1 hora. No entanto, para evitar que o lodo fique sem recircular no sistema por 1 hora, é realizado um cálculo proporcional, e então o equipamento é programado para ficar ligado por 5 minutos e desligado por 30 minutos, ou outro valor determinado pelo operador.

O aerador é temporizado principalmente para permitir que o consumo de energia seja otimizado. Ao programar períodos de funcionamento e desligamento adequados, é possível reduzir o tempo em que o aerador está em operação, resultando em economia de energia elétrica. Além disso, a temporização também pode ser utilizada para controlar o suprimento de oxigênio no reator aeróbio, garantindo condições ideais para a atividade dos microrganismos responsáveis pelo tratamento do efluente.

No Quadro 6 é possível observar, em síntese, o que foi diagnosticado na análise estrutural da ETE 1 e medidas corretivas possíveis de serem adotadas para melhorias no sistema de tratamento.

Quadro 6 – Avaliação e medidas corretivas para correção da estrutura da ETE 1

Unidade do sistema	Problema observado	Medida corretiva
Tanque de entrada	Ausência de gradeamento ou cesto	Instalar gradeamento ou cesto
Tanque anóxico	Ausência da recirculação interna do licor misto do tanque de aeração ao tanque anóxico	Adotar a recirculação interna do licor misto para o tanque anóxico
Decantador secundário	Lodo ascendente devido à desnitrificação no decantador	Adotar a recirculação interna do licor misto para o tanque anóxico
Quadro de comando	Temporizadores atuais limitam a programação dos equipamentos	Substituir os temporizadores atuais por temporizadores mais flexíveis que permitam uma programação mais versátil dos equipamentos.
Motobombas	Ausência de medidor de vazão automático	Instalação de um medidor de vazão automático

Fonte: De autoria própria

5.2.2 Avaliação da biomassa aeróbia da ETE 1

5.2.2.1 Levantamento de sólidos e IVL

Como mencionado anteriormente, o levantamento de sólidos da ETE 1 compreendeu a análise de sólidos totais, sólidos voláteis totais, sólidos suspensos totais e sólidos suspensos voláteis.

Os valores determinados em laboratório estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultado das análises de sólidos no reator aeróbio da ETE 1³

		1ª análise	2ª análise	3ª análise	4ª análise
ETE 1	ST (mg/L)	1.020	1.308	688	950
	SVT (mg/L)	624	966	466	716
	SST (mg/L)	915	544	332	117
	SSV (mg/L)	525	400	364	300

Fonte: De autoria própria

Pode-se observar que a biomassa presente no reator (SSVTA) é significativamente inferior àquela considerada no projeto da ETE. Na primeira análise,

³ Os dados indicados em vermelho apresentaram resultados inconsistentes, uma vez que é impossível que os SSV sejam maiores do que os SST. Esses resultados provavelmente contêm erros devido à perda de peso nas membranas usadas para reter os sólidos suspensos. Nas duas primeiras análises, foi utilizado um kit de filtração de policarbonato que permitia um acesso mais fácil à membrana, sem danificá-la. No entanto, nas duas últimas análises, foi utilizado um kit de filtração de policarbonato diferente, onde o acesso à membrana estava mais difícil, e ao retirá-la do kit para transferi-la aos cadinhos, a membrana acabou sendo danificada.

obteve-se um resultado de 525 mg/L de sólidos suspensos voláteis, que foi o valor mais alto entre as análises realizadas. No entanto, essa concentração representa apenas cerca de 18% da concentração de SSVTA considerada no projeto, indicando que o sistema apresenta problemas com perda de sólidos.

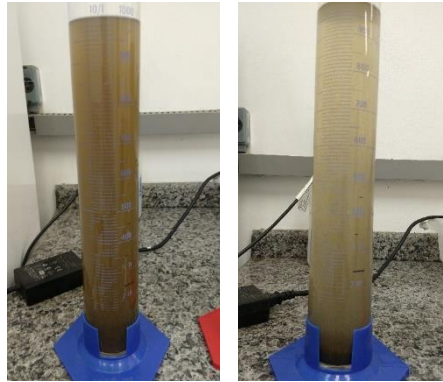
Esses problemas podem estar relacionados à vazão dos equipamentos do sistema. Há duas motobombas de recalque de esgoto bruto que lançam o efluente a uma vazão de 14,4 m³/h, ou seja, 7 vezes a vazão média de projeto da ETE. Além disso, a motobomba de recirculação possui uma vazão de 12 m³/h, o que corresponde a 6 vezes a vazão de projeto. Essas altas vazões contribuem para a diminuição do tempo de detenção hidráulica e de retenção celular, levando consigo o lodo ativado para fora do sistema. Além disso, o mau funcionamento do decantador decorrente da alta vazão da motobomba de recirculação do lodo também contribui para a perda de sólidos.

Sendo assim, a medida corretiva a ser adotada visando o aumento do tempo de detenção hidráulica, bem como do tempo de retenção celular, é a instalação de inversores de frequência nos equipamentos citados. Isso permitirá controlar a vazão dos equipamentos de acordo com a demanda do sistema, prolongando o tempo de permanência dos sólidos no processo de tratamento.

É importante ressaltar que não há disponibilidade no mercado para equipamentos de menor vazão que possam ser instalados em tanques de tratamento de esgoto, devido à alta concentração de sólidos presente no esgoto. Equipamentos menores normalmente são projetados para águas com baixa concentração de sólidos, e sua utilização na ETE poderia levar ao entupimento prematuro devido à grande quantidade de sólidos presentes, principalmente devido ao descarte inadequado de resíduos nas peças sanitárias.

Além das análises mencionadas anteriormente, foram realizadas verificações dos sólidos sedimentáveis para calcular o Índice de Volume de Lodo (IVL) de acordo com a Equação 3. A Figura 25 mostra o lodo misturado ao efluente e os sólidos sedimentados após passados 30 minutos.

Figura 25 – Sólidos sedimentáveis da ETE 1 (4ª análise)



Fonte: De autoria própria

Os resultados das análises de sólidos sedimentáveis e do IVL estão resumidos na Tabela 4, juntamente com a classificação da sedimentabilidade do lodo conforme von Sperling (2016a).

Tabela 4 – IVL da ETE 1⁴

		1ª análise	2ª análise	3ª análise	4ª análise
ETE 1	Sólidos sedimentáveis (mL/L)	86	110	50	50
	IVL (mL/g)	94	202	73	53
	Sedimentabilidade	Boa	Ruim	"Boa"	"Boa"

Fonte: De autoria própria

Apesar de a maioria das análises de IVL ter apresentado resultados positivos, na prática é observada uma má formação dos flocos, com flocos pequenos e dispersos (será abordado posteriormente na seção de microscopia). Isso compromete o objetivo de alcançar o melhor desempenho possível do sistema de tratamento, comprometendo a eficiência para a qual a ETE foi projetada.

A turbulência gerada pelo aerador pode afetar negativamente a formação e estabilidade dos flocos no processo de tratamento. A agitação intensa e aeração excessiva podem romper os flocos biológicos formados, dispersando-os no meio líquido e diminuindo a eficiência da sedimentação no decantador. Isso pode resultar em uma menor eficiência de tratamento do sistema, comprometendo a qualidade do efluente tratado. Portanto, é importante controlar adequadamente a intensidade e o

⁴ Os resultados em vermelho indicam que, devido às inconsistências nas terceira e quarta análises de SS para a ETE 1, o IVL foi calculado com base no resultado de ST, em vez de SS. Como os sólidos totais estão em maior concentração do que os sólidos suspensos, o valor do IVL apresentado nessas duas análises está subestimado.

tempo de operação do aerador, garantindo condições ideais para a formação e manutenção dos flocos biológicos no processo de tratamento. No entanto, devido ao modelo do aerador (motobomba com tubo de Venturi adaptado), não é possível controlar a intensidade do equipamento.

5.2.2.2 *Respirometria*

Quando ocorre um alto consumo de oxigênio, é possível inferir que a eficiência do tratamento do efluente é satisfatória, pois a biomassa está se desenvolvendo e removendo o substrato (WOLFF, 2005). Portanto, através dos respirogramas pode-se obter os valores de QO_2X , $(QO_2X)_{Amáx}$ e $(QO_2X)_{Hmáx}$. Por outro lado, o valor de QO_2 é obtido quando se conhece a concentração celular (X). A biomassa autotrófica e heterotrófica foi calculada de acordo com a Equação 5 e Equação 6, respectivamente. Assim, os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados do consumo de oxigênio (QO_2X), velocidade específica de respiração (QO_2), velocidade de consumo de oxigênio da biomassa autotrófica ($(QO_2X)_{Amáx}$) e heterotrófica ($(QO_2X)_{Hmáx}$) e concentração da biomassa autotrófica (X_A) e heterotrófica (X_H) da ETE 1⁵

	1ª análise	2ª análise	3ª análise	4ª análise
ETE 1 QO_2X (mgO ₂ /L.h)	12,95	54,64	9,61	10,23
SST (gSST/L)	0,91	0,54	0,33	0,12
QO_2 (mgO ₂ /gSST.h)	14,15	100,43	28,96	87,64
$(QO_2X)_{Amáx}$ (mgO ₂ /L.h)	12,42	45,72	41,88	14,04
$(QO_2X)_{Hmáx}$ (mgO ₂ /L.h)	42,00	58,27	51,26	24,34
X_A (gDQO/L)	0,92	3,38	3,10	1,04
X_H (gDQO/L)	11,92	16,54	14,55	6,91

Fonte: De autoria própria

As taxas de respiração celular (QO_2X) obtidas nos testes respirométricos variaram de 9,61 a 54,64 mgO₂/L.h, sendo que ambos os extremos estão fora da faixa normalmente encontrada em sistemas de lodo ativado, que é de 10 a 40 mgO₂/L.h (VAN HAANDEL; CATUNDA, 1982). Por sua vez, as taxas específicas de respiração

⁵ Os valores em vermelho indicam que, devido às inconsistências nas terceira e quarta análises de SST para a ETE 1, os valores de QO_2 também foram afetados, uma vez que os SST são utilizados como base para o cálculo desse parâmetro.

(QO_2) variaram de 14,15 a 100,43 $mgO_2/gSST.h$. Observa-se que a baixa concentração de sólidos suspensos resultou em um aumento significativo na taxa de consumo de oxigênio (QO_2), uma vez que essas grandezas são inversamente proporcionais. Além disso, é importante ressaltar que, devido às inconsistências mencionadas anteriormente em relação às análises de sólidos suspensos, o resultado da taxa específica de respiração obtida pode diferir da realidade.

Para fins de comparação, Couto (2007) utilizou um Reator Híbrido em Batelada Sequencial (RHBS) para o tratamento de esgoto doméstico. Através de testes respirométricos em bancada, foram obtidas taxas de consumo de oxigênio celular variando de 19,8 a 90,6 $mgO_2/L.h$, e taxas específicas de consumo de oxigênio variando de 7,8 a 25,2 $mgO_2/gSST.h$.

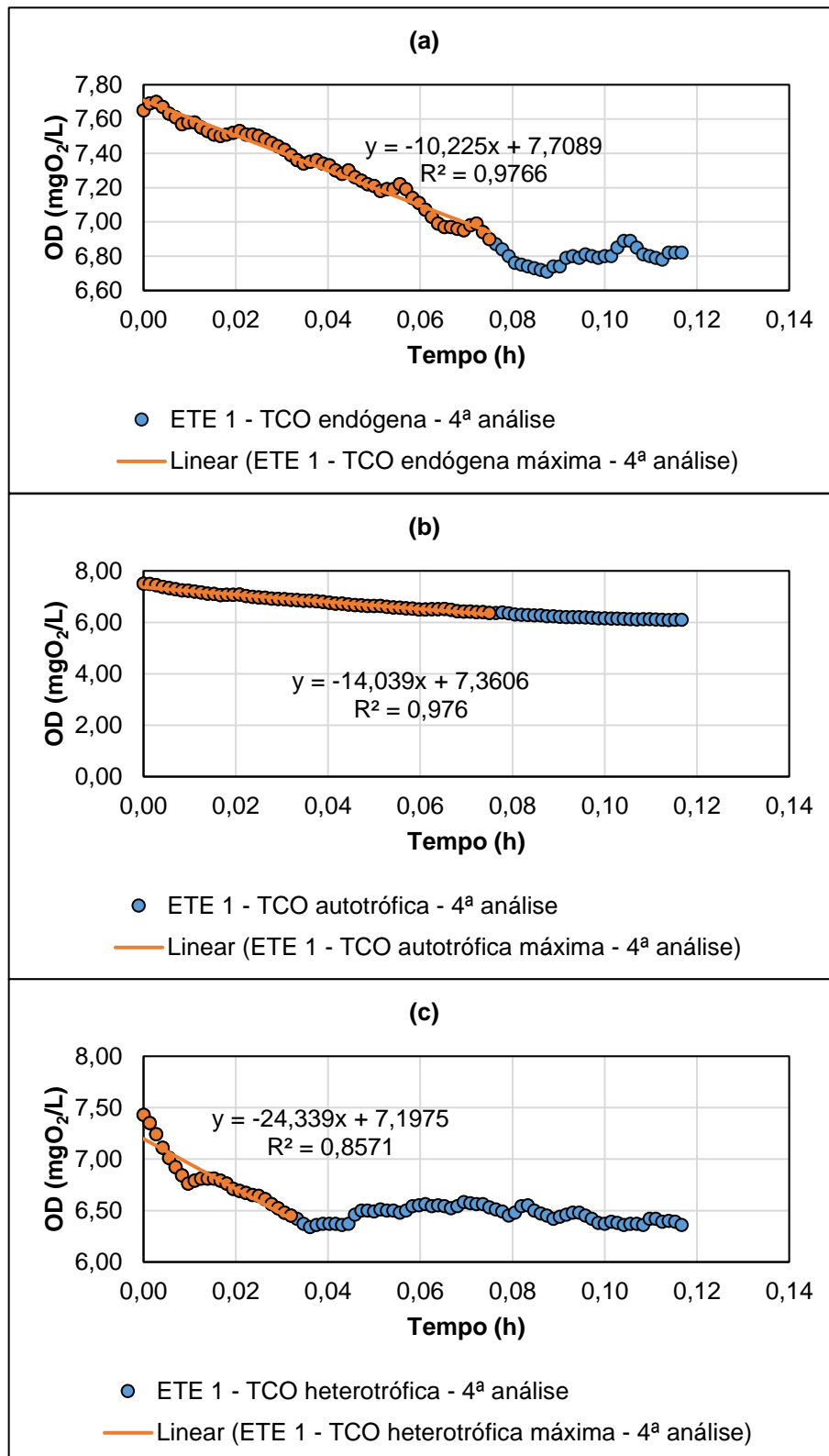
A taxa de consumo de oxigênio durante o processo de nitrificação variou de 14,21 a 61,20 $mgO_2/L.h$. Medeiros, Cavalcanti e van Haandel (2006), ao realizarem testes respirométricos em amostras de lodo em excesso gerado no sistema de tratamento da CETREL, obtiveram uma taxa de consumo de oxigênio durante a nitrificação de aproximadamente 10,8 $mgO_2/L.h$, após adição de 5 mgN/L de solução de NH_4Cl .

Em relação à taxa de consumo de oxigênio durante a respiração heterotrófica, foi observado que variou entre 24,34 e 58,27 $mgO_2/L.h$. Costa *et al.* (2002), ao utilizarem amostras de lodo ativado de um sistema do tipo Bardenpho, obtiveram uma taxa de consumo de oxigênio celular (QO_2X) durante a respiração heterotrófica de 38,7 $mgO_2/L.h$ após a adição de 170 $mgDQO/L$ de solução de acetato de sódio.

Por fim, os resultados indicam que a biomassa ativa é composta principalmente por organismos heterotróficos. A primeira análise revelou uma diferença significativa entre a biomassa ativa autotrófica e a biomassa ativa heterotrófica, sendo que a quantidade de biomassa ativa heterotrófica foi aproximadamente 13 vezes maior do que a quantidade de biomassa ativa autotrófica.

Na Figura 26 a seguir é possível observar três respirogramas obtidos através da avaliação da respirometria do lodo da ETE 1.

Figura 26 – (a) TCO endógena máxima da ETE 1; (b) TCO autotrófica máxima da ETE 1; e (c) TCO heterotrófica máxima da ETE 1



Fonte: De autoria própria

5.2.2.3 *Microscopia*

Ao observar a sedimentabilidade do lodo por meio da medição dos sólidos sedimentáveis após 30 minutos de sedimentação, ainda foi possível notar uma quantidade significativa de sólidos suspensos na proveta. Nas análises microscópicas, constatou-se a ausência de bactérias filamentosas no lodo, indicando um lodo disperso. Esse fato tem um impacto direto na formação inadequada do floco biológico e, conseqüentemente, em uma sedimentabilidade média do lodo. Além disso, foram utilizados, principalmente, aumentos de 40 e 100 vezes para identificar a estrutura do floco e os organismos mais presentes no lodo ativado da ETE 1.

Na primeira análise não foi observado muita variedade de microrganismos nos aumentos de 40 e 100 vezes, tampouco de microrganismos filamentosos. No aumento de 400 vezes foi possível detectar alta quantidade de bactérias livres e pequenos grupos de algas e fungo filamentoso. O mesmo é válido para a segunda análise.

Na terceira análise, além das características do floco serem semelhante às análises precedentes, observou-se dois protozoários do gênero *Vorticella* nadando livremente em busca de um local para se fixarem. Também foram encontradas três pequenas colônias de protozoário do gênero *Epistylis* (5 a 30 microrganismos por colônia).

Por fim, na quarta análise, foram identificados dois protozoários do gênero *Vorticella* nadando livremente em busca de um local para se fixarem, assim como na análise anterior. Além disso, foram observadas duas grandes colônias contendo protozoários do gênero *Epistylis*, com uma média de 200 a 500 microrganismos por colônia.

Segundo Hoffmann (2004), a presença de *Vorticella* no lodo ativado é um indicador de um sistema com alta eficiência biológica e lodo bem oxigenado. Por outro lado, a presença de *Epistylis* no lodo ativado pode ser um indicativo de problemas no sistema de tratamento. Sua ocorrência pode indicar condições inadequadas, tais como baixa eficiência na remoção de poluentes, deficiência na oxigenação, desequilíbrio no sistema biológico ou sobrecarga de nutrientes. No entanto, é importante destacar que a quantidade de microrganismos do gênero *Epistylis* superou significativamente a presença de *Vorticella*, o que demanda uma investigação mais aprofundada e a adoção de medidas corretivas para restabelecer a saúde do sistema de tratamento de águas residuais.

A seguir a Figura 27 representa as fotografias retiradas do lodo ativado da ETE 1.

Figura 27 – (a) Ampliação de 40x, com observação do floco; (b) Ampliação de 40x no microscópio invertido, com observação do floco; (c) Ampliação de 40x, identificada a presença de microrganismos do gênero *Vorticella*; (d) Ampliação de 100x, identificada a presença de microrganismos do gênero *Epistylis*; (e) Ampliação de 40x, identificado a presença de microrganismos do gênero *Vorticella*; e (f) Ampliação de 40x, identificado uma grande colônia de microrganismos do gênero *Epistylis*.



Fonte: De autoria própria

Na Quadro 7, é possível observar um resumo dos problemas apresentado na avaliação biomassa da ETE 1, bem como possíveis medidas corretivas que podem ser adotadas para melhorar o sistema de tratamento.

Quadro 7 – Problemas observados nas análises da biomassa da ETE 1 e medidas corretivas

Unidade do sistema	Problema observado	Medida corretiva
Reator aeróbio	Baixa concentração de biomassa (SSV) no reator aeróbio	Instalar inversores de frequências em ambas as motobombas de recalque
Motobombas de recalque de lodo e recirculação do lodo	Baixa concentração de biomassa (SSV) no reator aeróbio	Instalar inversor de frequência
Aerador	Alta intensidade de turbulência forma um lodo disperso e com flocos abertos	Substituição do aerador com tubo de Venturi por soprador

Fonte: De autoria própria

5.2.3 Avaliação da eficiência de tratamento da ETE 1

Na Tabela 6 é possível verificar as concentrações dos parâmetros DBO, fósforo total e nitrogênio amoniacal, bem como as eficiências de remoções, nas análises dos meses de fevereiro e abril de 2023.

Tabela 6 – Concentrações e eficiências de remoção de DBO, fósforo e nitrogênio amoniacal

	DBO (mg/L)			P (mg/L)			NH ₄ -N (mg/L)		
	Bruto	Tratado	Efic. (%)	Bruto	Tratado	Efic. (%)	Bruto	Tratado	Efic. (%)
fev/23	535,70	9,50	98	8,66	5,98	31	49,20	2,90	94
abr/23	476,20	54,50	89	6,32	6,08	4	-	32,00	-

Fonte: Retirado do laudo de análises da ETE 1

Considerando a média das análises de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) no esgoto bruto em 2023, observa-se que está 58% acima da DBO de esgoto bruto considerada no projeto para o dimensionamento do sistema. Além disso, a concentração de DBO no esgoto tratado apresenta um valor 540% acima do valor esperado de 5,0 mg/L, e a média da eficiência de remoção (93,5%) está 5% abaixo do valor previsto no projeto (98,5%). No entanto, é importante ressaltar que em ambas as análises de 2023, esse parâmetro esteve em conformidade com a Resolução CONAMA nº 430/2011 e a Resolução CONSEMA nº 181/2023, que são as resoluções federais e estaduais aplicáveis, respectivamente.

Quanto ao fósforo total, não há exigência nas legislações aplicáveis, uma vez que o esgoto é lançado no sistema de drenagem pluvial, e o limite de 4,00 mg/L para o fósforo se aplica apenas ao lançamento em ambientes lênticos. No entanto, foram observadas concentrações acima de 4,00 mg/L, com baixa eficiência de remoção desse nutriente. A média das duas análises foi de 17%, sendo abril o mês com eficiência de remoção mais baixa, de apenas 4%. Essa remoção de fósforo provavelmente ocorreu apenas por mecanismos físicos e não biológicos. Esses resultados estão de acordo com o esperado, uma vez que o sistema não foi projetado para a remoção de fósforo.

Para o nutriente nitrogênio amoniacal total, a legislação federal estabelece um limite de 20,00 mg/L, porém não há cobrança implícita, sendo responsabilidade do órgão ambiental competente. Analisando os resultados apresentados, a concentração média de nitrogênio amoniacal total no lançamento foi de 17,45 mg/L. A eficiência de remoção só pôde ser calculada para o mês de janeiro, atingindo 94%, devido a mudanças nas normas do órgão ambiental licenciador não foram feitas mais análises deste nutriente no esgoto bruto. É importante ressaltar que a ETE foi projetada apenas para o processo de nitrificação, portanto, as concentrações de nitrato, que é um subproduto da nitrificação, possivelmente estão elevadas. No entanto, essas concentrações não são monitoradas para determinar sua exata magnitude, embora em altas concentrações possam levar à eutrofização de corpos d'água e afetar a qualidade da água potável.

5.3 AVALIAÇÃO DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO 2

5.3.1 Avaliação estrutural da ETE 2

A ETE 2, da mesma forma que a ETE 1, foi construída abaixo do nível do solo, para melhor aproveitamento da área do condomínio residencial. Situa-se, inclusive, em local de passagem de moradores, como pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 – Vista geral da ETE 2



Fonte: De autoria própria

A ETE 2 foi projetada para atender uma população final de 268 contribuintes. Os parâmetros de projetos adotados estão mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 – Dados de projeto da ETE 2

Variável		Valor adotado ou encontrado	Unidade
População	C	268	hab.
Geração per capta de esgoto	p	0,16	m ³ /hab.d
Vazão diária	Q	43,0	m ³ /d
	Q	1,80	m ³ /h
Vazão horária de pico	Qh	3,30	m ³ /h
Período de contribuição	c	24,00	h/d
DBO de entrada	So	450,00	mg/L
DBO de saída	Se	20,00	mg/L
Carga orgânica per capta	Kc	0,05	kg/hab.dia
Carga orgânica bruta	Ko	57,60	kg/dia
Temperatura	T	20 – 36	°C
SSVTA	X	2.500	mg/L
SSV no reciclo do lodo	Xr	6.000	mg/L
Tempo de retenção celular	θ_c	12	dias
	Ks	60,00	mg/L
Coefficientes cinéticos	Y	0,50	mg.SSV/mgDBO
	Kd	0,06	d ⁻¹
	fb'	0,69	gSSb/gSSV

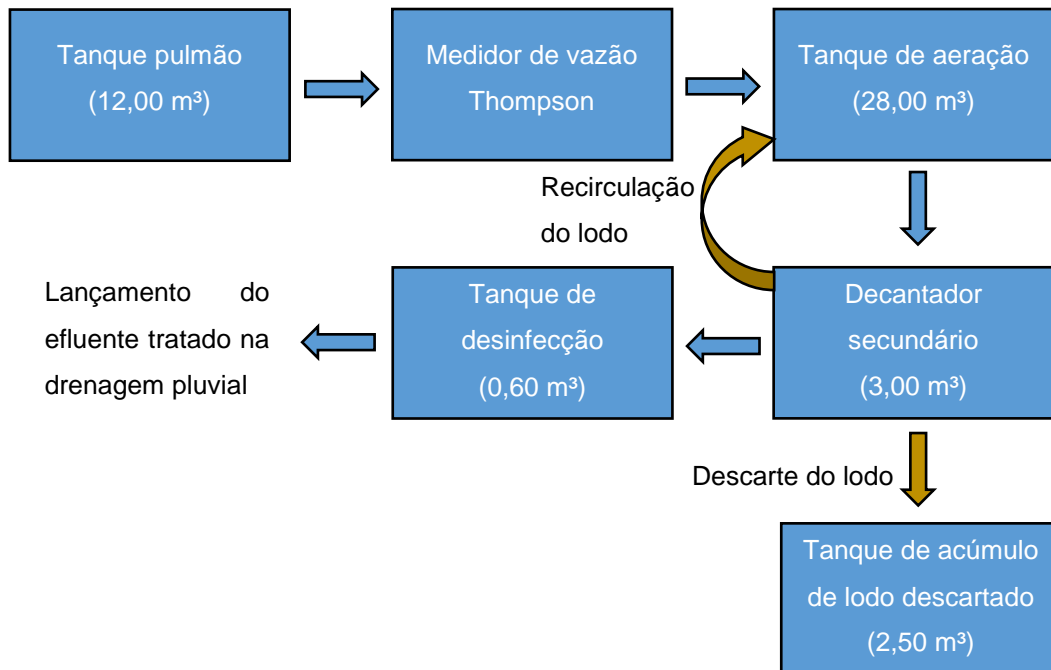
Fonte: Projeto da ETE 2

De acordo com o projeto da ETE 2, ela foi dimensionada com idade de lodo de 12 dias, que, assim como a ETE 1, encontra-se ligeiramente superior ao valor proposto por von Sperling (2016a) para um sistema convencional (4-10 dias), contudo, dentro da faixa aceita por Jordão e Pessôa (1995) para a idade do lodo em sistemas convencionais (4 a 15 dias).

A planta baixa e perfil hidráulico da ETE 2, retirados do projeto do sistema, estão disponíveis no Anexo B.

O fluxograma de processo da ETE 2 está apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Fluxograma da ETE 2



Fonte: De autoria própria

Todo o sistema é construído de Plástico Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) e está enterrado. As tampas de acesso foram colocadas estrategicamente para permitir o acesso aos equipamentos e peças hidráulicas relevantes, tais como as motobombas e calhas coletoras de água clarificada localizadas no decantador.

Ademais, observa-se que a ETE 2 não possui tanque anóxico. Portanto, os nitratos são direcionados ao decantador secundário e recirculados apenas com o lodo aeróbio de volta ao tanque de aeração, bem como ao efluente final, uma vez que não é prevista a desnitrificação do sistema.

O detalhamento de cada processo unitário da ETE 2, bem como o levantamento em campo com imagens das unidades é apresentado a seguir.

5.3.1.1 *Tanque pulmão*

Um tanque pulmão antes de uma estação de tratamento de esgoto é utilizado para armazenar e regularizar o fluxo de esgoto que chega à estação de tratamento. O tanque é projetado para permitir que o esgoto flua para dentro e para fora em um ritmo constante, independentemente das flutuações de vazão que possam ocorrer na entrada. No entanto, na prática, esse tanque funciona como uma estação elevatória de esgoto bruto, semelhante à ETE 1, uma vez que a vazão de recalque não se mantém constante ao longo do dia. O volume útil deste tanque é de 12,00 m³.

O tanque pulmão, que é o primeiro componente do sistema, foi observado sem a presença de cesto ou gradeamento. A falta desses dispositivos pode comprometer o sistema, permitindo a passagem de resíduos sólidos para as etapas subsequentes, inclusive dentro do próprio tanque, onde estão localizadas duas motobombas responsáveis pelo recalque do esgoto bruto. É recomendada a instalação de cesto ou gradeamento como medidas preventivas para evitar problemas operacionais e danos aos equipamentos.

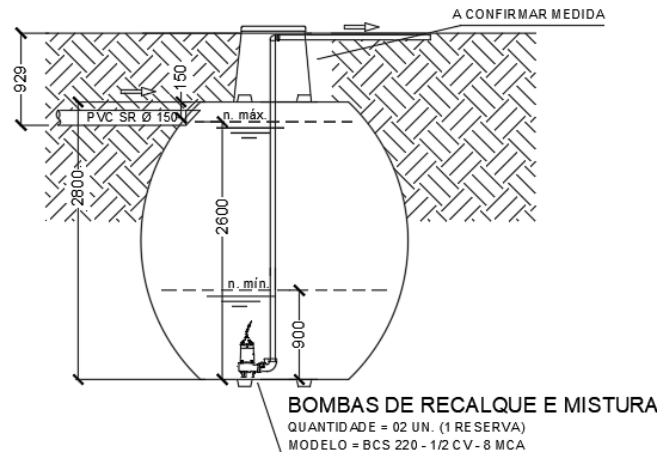
Na Figura 30, é apresentado o tanque pulmão, enquanto a Figura 31 fornece informações detalhadas sobre o corte transversal do projeto desse tanque.

Figura 30 – Elevatória de esgoto bruto



Fonte: De autoria própria

Figura 31 – Corte da elevatória de esgoto bruto



Fonte: Projeto da ETE 2

5.3.1.2 Medidor de vazão Thompson

O Medidor de Vazão do tipo Thompson é baseado em um estreitamento de canal no formato de "V" para medir a vazão. O efluente, ao passar por este estreitamento em V, possibilita o cálculo da vazão em tempo real, proporcionado pela razão entre a altura da água e as dimensões da canaleta. O medidor de vazão do tipo Thompson é de concepção simples, porém muito funcional e possui excelente durabilidade e confiabilidade.

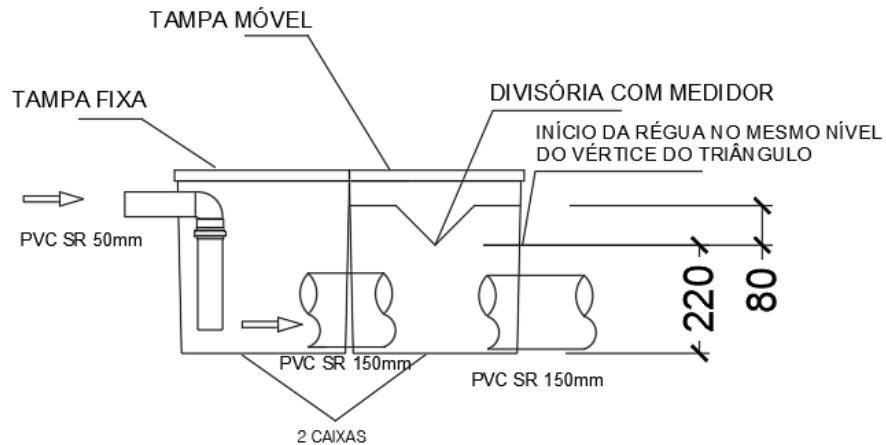
Na Figura 32, é apresentado o medidor de vazão Thompson, enquanto a Figura 33 fornece informações detalhadas sobre o corte transversal do projeto do medidor de vazão.

Figura 32 – Medidor de vazão Thompson



Fonte: De autoria própria

Figura 33 – Corte do medidor Thompson



Fonte: Projeto da ETE 2

5.3.1.3 Tanque de aeração

Esta unidade é responsável pela cultura de microrganismos ativos, proporcionando condições ideais para o desenvolvimento e desempenho dos microrganismos responsáveis pela degradação biológica. São fornecidos oxigênio, micro e macro nutrientes, e um tempo de detenção adequado para garantir a eficiência dos processos. O volume útil deste tanque é de 28,00 m³.

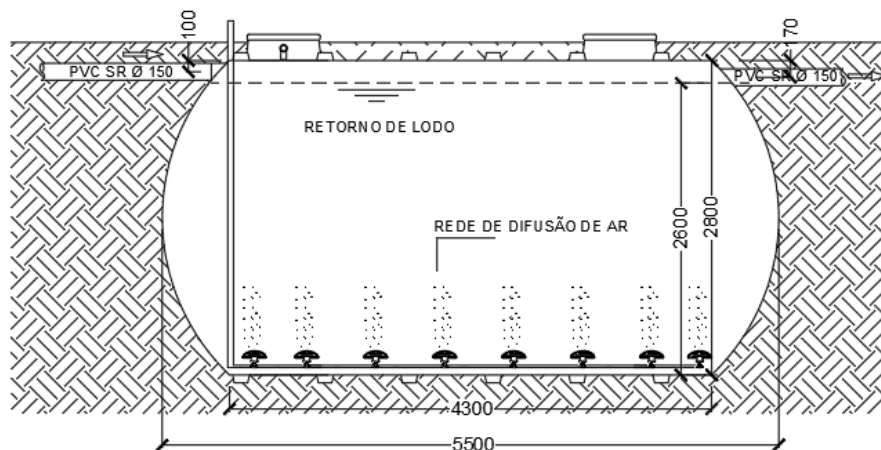
Na Figura 34, é apresentado o tanque de aeração, enquanto a Figura 35 fornece informações detalhadas sobre o corte transversal do projeto desse tanque.

Figura 34 – (a) Tanque de aeração, acesso 1; e (b) tanque de aeração, acesso 2.



Fonte: De autoria própria

Figura 35 – Corte do tanque de aeração



Fonte: Projeto da ETE 2

5.3.1.4 Decantador secundário

O decantador secundário tem a função de separar os sólidos suspensos do efluente tratado. Estes sólidos são formados pelos microrganismos ativos no tanque

de aeração e dos inativos. Portanto, com sua sedimentação, os mesmos retornam ao tanque de aeração e o líquido clarificado segue superficialmente ao destino final. O meio utilizado para efetuar o reciclo do lodo é forçado por motobomba submersível situada no fundo da unidade de decantação, que direciona o lodo sedimentado de volta ao tanque de aeração. O volume útil deste tanque é de 3,00 m³.

Percebe-se que a calha coletora dessa unidade de tratamento é lisa, não apresentando dentes, ao contrário do decantador secundário da ETE 1. A presença de uma calha coletora com dentes é fundamental, pois impede a saída de lodo ativado do sistema de tratamento, evitando sua presença no efluente final da ETE. Portanto, a instalação de uma calha coletora com dentes é essencial para evitar a perda de lodo ativado, que desempenha um papel importante no processo de tratamento.

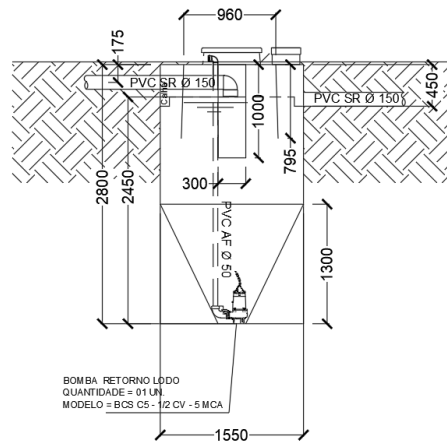
Na Figura 36, é apresentado o decantador secundário e os registros para manobras da recirculação e descarte do lodo, enquanto a Figura 37 fornece informações detalhadas sobre o corte transversal do projeto desse tanque.

Figura 36 – (a) Decantador, acesso 1; (b) decantador, acesso 2; e (c) registros da recirculação e retorno do lodo



Fonte: De autoria própria

Figura 37 – Corte do decantador secundário



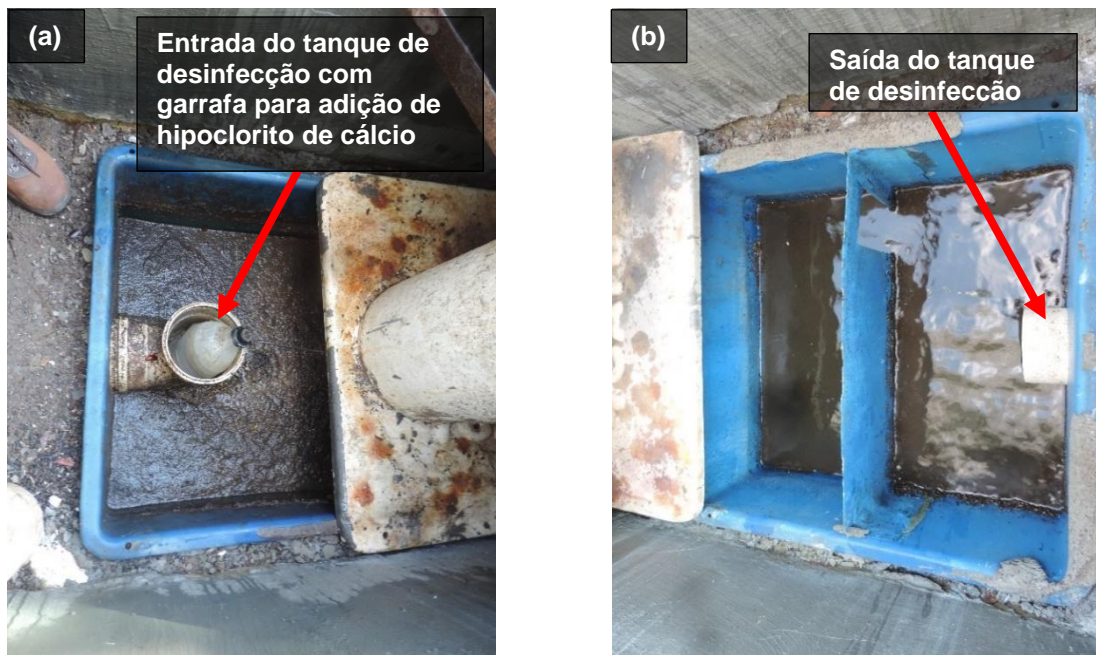
Fonte: Projeto da ETE 2

5.3.1.5 *Tanque de contato*

O tanque de contato (ou desinfecção) é utilizado para eliminar ou desativar microrganismos patogênicos presentes no efluente já tratado. Isso é realizado através de um tempo de contato de 30 minutos para esta ETE em específico. Pastilhas de cloreto de cálcio, com peso de 200 g cada, são utilizadas para esse propósito e são dispostas em uma garrafa, por onde o efluente tratado proveniente do decantador passa. Além do mais, este tanque de contato possui chicanas internas para promover a mistura e volatilização do cloro excedente. O volume útil deste tanque é de 0,60 m³.

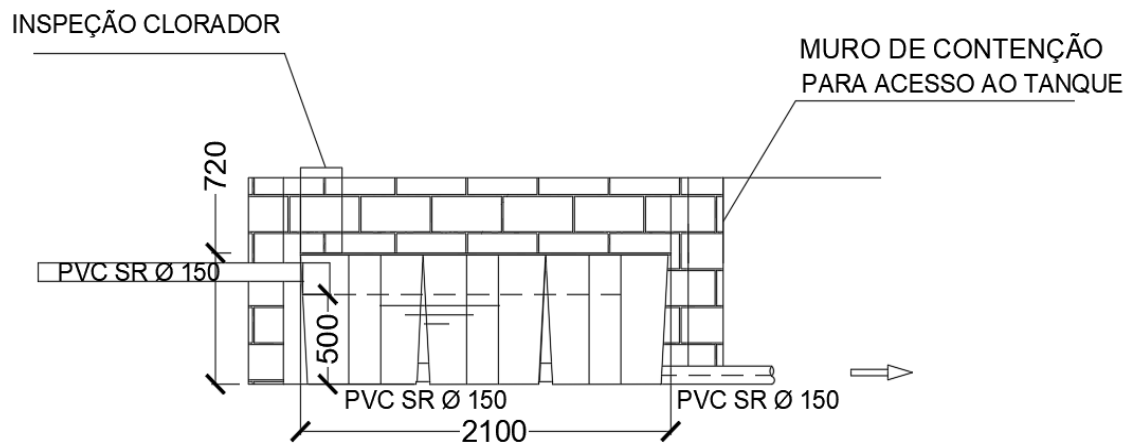
Na Figura 38, é apresentado o tanque de contato, enquanto a Figura 39 fornece informações detalhadas sobre o corte transversal do projeto desse tanque.

Figura 38 – (a) Início do tanque de desinfecção com garrafa para adição de hipoclorito de cálcio; e (b) final do tanque de desinfecção



Fonte: De autoria própria

Figura 39 – Corte do tanque de desinfecção



Fonte: Projeto da ETE 2

5.3.1.6 Tanque de acúmulo

Devido ao excesso de lodo produzido pelos microrganismos aeróbios, é necessário prever o descarte de lodo. Para esse fim, foi projetada uma unidade de armazenamento para o lodo excedente. A própria motobomba responsável pelo retorno do lodo ao tanque de aeração transfere o excesso para a unidade de armazenamento de lodo por meio de uma inversão de válvulas. O lodo excedente

permanece nessa unidade até que sua capacidade volumétrica seja totalmente utilizada. Nesse momento, ele deve ser removido por um caminhão auto vácuo. O volume útil deste tanque é de 2,50 m³.

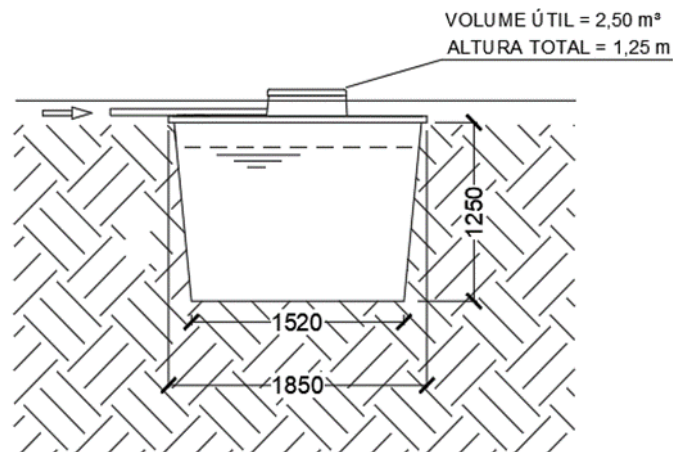
Na Figura 40, é apresentado o tanque de acúmulo (ou tanque para depósito de lodo descartado), enquanto a Figura 41 fornece informações detalhadas sobre o corte transversal do projeto desse tanque.

Figura 40 – Tanque de acúmulo



Fonte: De autoria própria

Figura 41 – Corte do tanque de acúmulo



Fonte: Projeto da ETE 2

5.3.1.7 Sistema eletromecânico

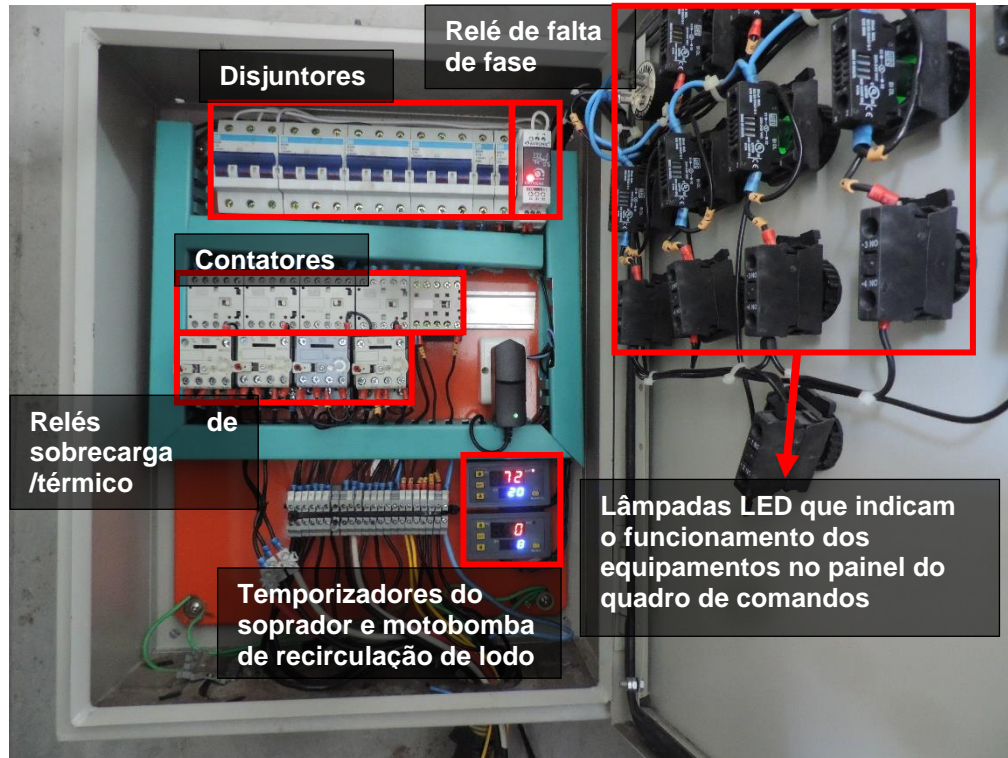
Os equipamentos eletromecânicos que compõem o sistema são:

- Duas motobombas submersíveis – Schneider BCS-220 1CV 380V Trifásica – de recalque de esgoto bruto;
- Um soprador – Elmo Rietschle SAH 55 – para aeração do reator aeróbio através de membranas com difusores do tipo bolha fina; e
- Uma motobomba submersível – Schneider BCS-220 1CV 380V Trifásica – para a recirculação e descarte do lodo.

A utilização de um soprador em substituição à motobomba de aeração por tubo de Venturi apresenta vantagens, tais como evitar turbulência excessiva e desestruturação do floco biológico, proporcionando uma maior área de contato entre as bolhas de oxigênio e o efluente no reator aeróbio. Além disso, minimiza problemas de obstrução dos equipamentos, uma vez que o soprador não está localizado internamente ao tanque de aeração. No entanto, requer um investimento inicial mais elevado e pode gerar um nível de ruído alto por estar situado fora da ETE, o que pode ocasionar desconforto aos residentes do condomínio. A utilização de uma câmara acusticamente isolada pode solucionar o problema de ruído.

Além disso, o painel de controle da ETE 2 desempenha a função de alojar os componentes elétricos essenciais, tais como disjuntores, relés, contadores, chaves seletoras, entre outros dispositivos, responsáveis pela operação, controle e proteção dos equipamentos presentes na estação de tratamento. A Figura 42 ilustra o painel de controle da ETE 2.

Figura 42 – Quadro de comandos da ETE 2



Fonte: De autoria própria

Os temporizadores da ETE 2, ao contrário da ETE 1, permitem que os equipamentos sejam ligados e desligados quantas vezes forem necessárias, proporcionando maior flexibilidade operacional do sistema. Isso significa que é possível programar os tempos de funcionamento e desligamento dos equipamentos de acordo com as demandas específicas do processo de tratamento, adaptando-se às condições variáveis do efluente e otimizando o desempenho da estação de tratamento.

É possível observar de forma resumida, no Quadro 8, os resultados da avaliação estrutural da ETE 2 e as possíveis medidas corretivas que podem ser implementadas para melhorar o sistema de tratamento.

Quadro 8 – Avaliação e medidas corretivas para correção da estrutura da ETE 2

Unidade do sistema	Problema observado	Medida corretiva
Elevatória de esgoto bruto	Ausência de gradeamento ou cesto	Instalar gradeamento ou cesto
Decantador secundário	Calha coletora lisa	Instalar calha coletora com dentes
Reator aeróbio	Ausência de recirculação interna do licor misto do tanque de aeração ao tanque anóxico	Implementar um novo tanque anóxico antes do reator aeróbio para receber a recirculação do licor misto (nitratos)
Motobomba de recalque de esgoto bruto	Ausência de medidor de vazão automático	Instalação de um medidor de vazão automático

Fonte: De autoria própria

5.3.2 Avaliação da biomassa da ETE 2

5.3.2.1 Levantamento de sólidos e IVL

Assim como para a ETE 1, o levantamento de sólidos na ETE 2 compreendeu a análise de sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), sólidos suspensos totais (SST) e sólidos suspensos voláteis (SSV). Os valores determinados em laboratório estão representados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultado das análises de sólidos no reator aeróbio da ETE 2⁶

	1ª análise	2ª análise	3ª análise	4ª análise
ST (mg/L)	494	462	312	686
SVT (mg/L)	220	290	158	534
ETE 2 SST (mg/L)	744	196	168	398
SSV (mg/L)	544	174	186	382

Fonte: De autoria própria

É possível constatar que a concentração de biomassa no reator é consideravelmente inferior àquela estabelecida no projeto da ETE 2. Na primeira

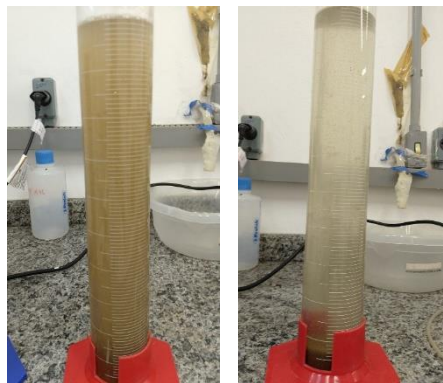
⁶ Os dados indicados em vermelho apresentaram resultados inconsistentes, uma vez que é impossível que os SSV sejam maiores do que os SST. Esses resultados provavelmente contêm erros devido à perda de peso nas membranas usadas para reter os sólidos suspensos. Nas duas primeiras análises, bem como na última análise, foi utilizado um kit de filtração de policarbonato que permitia um acesso mais fácil à membrana, sem danificá-la. No entanto, na terceira análise, foi utilizado um kit de filtração de policarbonato diferente, onde o acesso à membrana estava mais difícil, e ao retirá-la do kit para transferi-la aos cadinhos, a membrana acabou sendo danificada.

avaliação, registrou-se um valor de 544 mg/L de sólidos suspensos voláteis, o qual foi o mais elevado dentre as análises conduzidas. No entanto, essa concentração corresponde somente a aproximadamente 22% da concentração de SSVTA considerada em projeto, evidenciando a ocorrência de problemas relacionados à perda de sólidos no sistema.

Assim como na ETE 1, a ETE 2 possui uma elevatória de esgoto bruto com duas motobombas de recalque que têm uma vazão de até 21,3 m³/h cada. Essa vazão é aproximadamente 12 vezes maior do que a vazão de entrada de esgoto bruto no sistema de tratamento. A ETE 2 também enfrenta o problema de perda de sólidos devido às altas vazões dos equipamentos, conforme mencionado anteriormente para a ETE 1. Além disso, conforme observado na Figura 36-b, não há calha dentada na ETE 2, apenas uma calha lisa, o que permite que o lodo ascendente saia junto com o efluente final.

Além das análises previamente mencionadas, foram conduzidas avaliações dos sólidos sedimentáveis para determinar o IVL conforme descrito na Equação 3. A Figura 43 ilustra a presença de lodo misturado ao efluente, bem como os sólidos sedimentados após um período de 30 minutos.

Figura 43 – Sólidos sedimentáveis da ETE 2 (4ª análise)



Fonte: De autoria própria

Os resultados das análises de sólidos sedimentáveis e do IVL estão resumidos na Tabela 9, juntamente com a classificação da sedimentabilidade do lodo conforme von Sperling (2016a).

Tabela 9 – IVL da ETE 2⁷

		1ª análise	2ª análise	3ª análise	4ª análise
ETE 2	Sólidos sedimentáveis (mL/L)	70	25	10	65
	IVL (mL/g)	94	128	32	163
	Sedimentabilidade	Boa	Média	“Ótima”	Média

Fonte: De autoria própria

Embora a maioria das análises de IVL tenha indicado resultados favoráveis, na prática é notada uma deficiente formação dos flocos, caracterizados por sua pequena dimensão e dispersão (será abordado mais adiante na seção de microscopia). Essa situação compromete a meta de obter o desempenho ótimo do sistema de tratamento.

5.3.2.2 *Respirometria*

Por meio dos respirogramas, é possível obter os valores de QO_2X , $(QO_2X)_{Amáx}$ e $(QO_2X)_{Hmáx}$. Por sua vez, o valor de QO_2 é determinado quando a concentração celular (X) é conhecida. A biomassa autotrófica e biomassa heterotrófica foram calculadas conforme Equação 5 e Equação 6, respectivamente. Dessa forma, os resultados estão apresentados na Tabela 10.

⁷ Os resultados em vermelho indicam que, devido às inconsistências na terceira análise de SS para a ETE 2, o IVL foi calculado com base no resultado de ST, em vez de SS. Como os sólidos totais estão em maior concentração do que os sólidos suspensos, o valor do IVL apresentado nessa análise está subestimado.

Tabela 10 – Resultados do consumo de oxigênio (QO_2X), velocidade específica de respiração (QO_2), velocidade de consumo de oxigênio da biomassa autotrófica ($(QO_2X)_{Amáx}$) e heterotrófica ($(QO_2X)_{Hmáx}$) e concentração da biomassa autotrófica (X_A) e heterotrófica (X_H) da ETE 2⁸

	1ª análise	2ª análise	3ª análise	4ª análise
ETE 2 QO_2X (mgO ₂ /L.h)	20,61	31,46	63,23	12,15
X (gSST/L)	0,74	0,20	0,17	0,40
QO_2 (mgO ₂ /gSST.h)	27,70	160,53	376,36	30,53
$(QO_2X)_{Amáx}$ (mgO ₂ /L.h)	11,62	24,76	62,05	3,83
$(QO_2X)_{Hmáx}$ (mgO ₂ /L.h)	40,96	50,22	44,06	2,73
X_A (gDQO/L)	0,86	1,83	4,59	0,28
X_H (gDQO/L)	11,62	14,25	12,50	0,78

Fonte: De autoria própria

Os valores de consumo de oxigênio celular (QO_2X) obtidos nos testes respirométricos variaram de 12,15 a 63,23 mgO₂/L.h, sendo que a terceira análise está além da faixa típica observada em sistemas de lodo ativado, a qual varia de 10 a 40 mgO₂/L.h (VAN HAANDEL; CATUNDA, 1982). As taxas específicas de consumo de oxigênio (QO_2) apresentaram variação de 30,53 a 376,36 mgO₂/gSST.h. Observa-se que a baixa concentração de sólidos suspensos resultou em um aumento significativo na taxa de consumo de oxigênio, já que essas grandezas são inversamente proporcionais. É necessário destacar que, devido às inconsistências identificadas nas análises de sólidos suspensos mencionadas anteriormente, o resultado da taxa específica de consumo de oxigênio na terceira análise pode não refletir com precisão a realidade.

Como mencionado anteriormente neste trabalho, Couto (2007) obteve através de testes respirométricos de bancada velocidades de respiração celular variando entre 19,8 e 90,6 mgO₂/L.h, e velocidades específicas de respiração variando entre 7,8 e 25,2 mgO₂/gSST.h.

A velocidade de consumo de OD durante a nitrificação variou de 3,83 a 62,05 mgO₂/L.h. Como mencionado anteriormente, Medeiros, Cavalcanti e van Haandel (2006), ao realizarem testes respirométricos em amostras de lodo obtiveram uma

⁸ Os valores em vermelho indicam que, devido às inconsistências na terceira análise de SST para a ETE 2, o valor de QO_2 também foi afetado, uma vez que os SST são utilizados como base para o cálculo desse parâmetro.

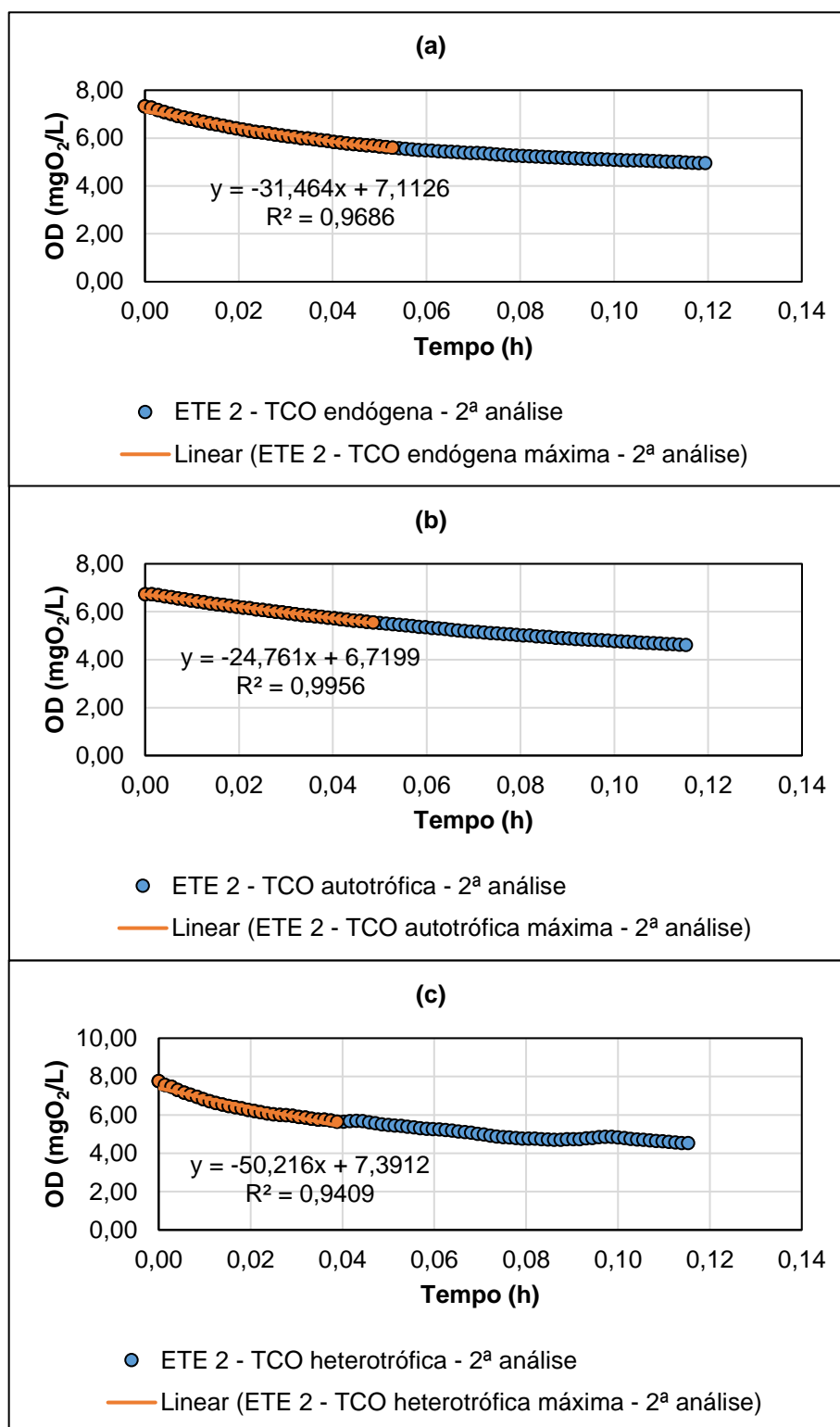
velocidade de consumo de OD durante o processo de nitrificação em torno de 10,8 mgO₂/L.h, após adição de 5 mgN/L de solução de NH₄Cl.

Em relação à velocidade de consumo de OD durante a respiração heterotrófica, foi observado que variou entre 2,73 e 50,22 mgO₂/L.h. Na quarta análise observou-se que a respiração heterotrófica foi menor que a respiração autotrófica. Costa *et al.* (2002), ao utilizar amostras de lodo ativado de um sistema do tipo Bardenpho, obtiveram uma velocidade de respiração celular (QO₂X) durante a respiração heterotrófica de 38,7 mgO₂/L.h após a adição de 170 mgDQO/L de solução de acetato de sódio.

Por fim, os resultados indicam que a população predominante na biomassa ativa é composta por organismos heterotróficos, apresentando uma quantidade superior em relação à biomassa ativa autotrófica em todas as análises realizadas. A maior diferença entre a biomassa ativa autotrófica e a biomassa ativa heterotrófica foi observada na primeira análise, sendo esta última 13,54 vezes maior.

Na Figura 44 a seguir é possível observar três respirogramas obtidos através da avaliação da respirometria do lodo da ETE 2.

Figura 44 – (a) TCO endógena máxima da ETE 2; (b) TCO autotrófica máxima da ETE 2; e (c) TCO heterotrófica máxima da ETE 2



Fonte: De autoria própria

5.3.2.3 Microscopia

Ao avaliar a sedimentabilidade do lodo por meio da medição dos sólidos sedimentáveis após 30 minutos de sedimentação, foi constatada a presença significativa de sólidos suspensos na proveta, de maneira similar à ETE 1. Nas análises microscópicas, foi observada a ausência de bactérias filamentosas no lodo, exceto na segunda análise, quando o lodo foi observado utilizando um microscópio invertido, revelando a presença de filamentos que se desprendiam dos flocos, resultando em flocos dispersos e abertos. Essa condição tem um impacto direto na formação inadequada dos flocos biológicos e, conseqüentemente, na sedimentabilidade média do lodo. Além disso, foram utilizadas ampliações de 40 e 100 vezes para identificar os organismos mais abundantes no lodo ativado da ETE 2.

Na primeira análise foi observado algumas colônias de *Epistylis*, um protozoário ciliado, que segundo Hoffmann (2004) pode ser um indicativo de problemas no sistema de tratamento. Por outro lado, foram encontrados três micrometazoários *Rotaria rotatoria* e sua presença pode indicar condições favoráveis, como boa qualidade da água, presença de matéria orgânica adequada para sua alimentação e níveis adequados de oxigênio dissolvido.

Na segunda análise o lodo manteve-se disperso e com flocos abertos. No microscópio invertido foi possível observar a presença de filamentos saindo do floco, mantendo-o aberto. Novamente foram observadas colônias de *Epistylis* e apenas um nematoide – verme abundante no solo.

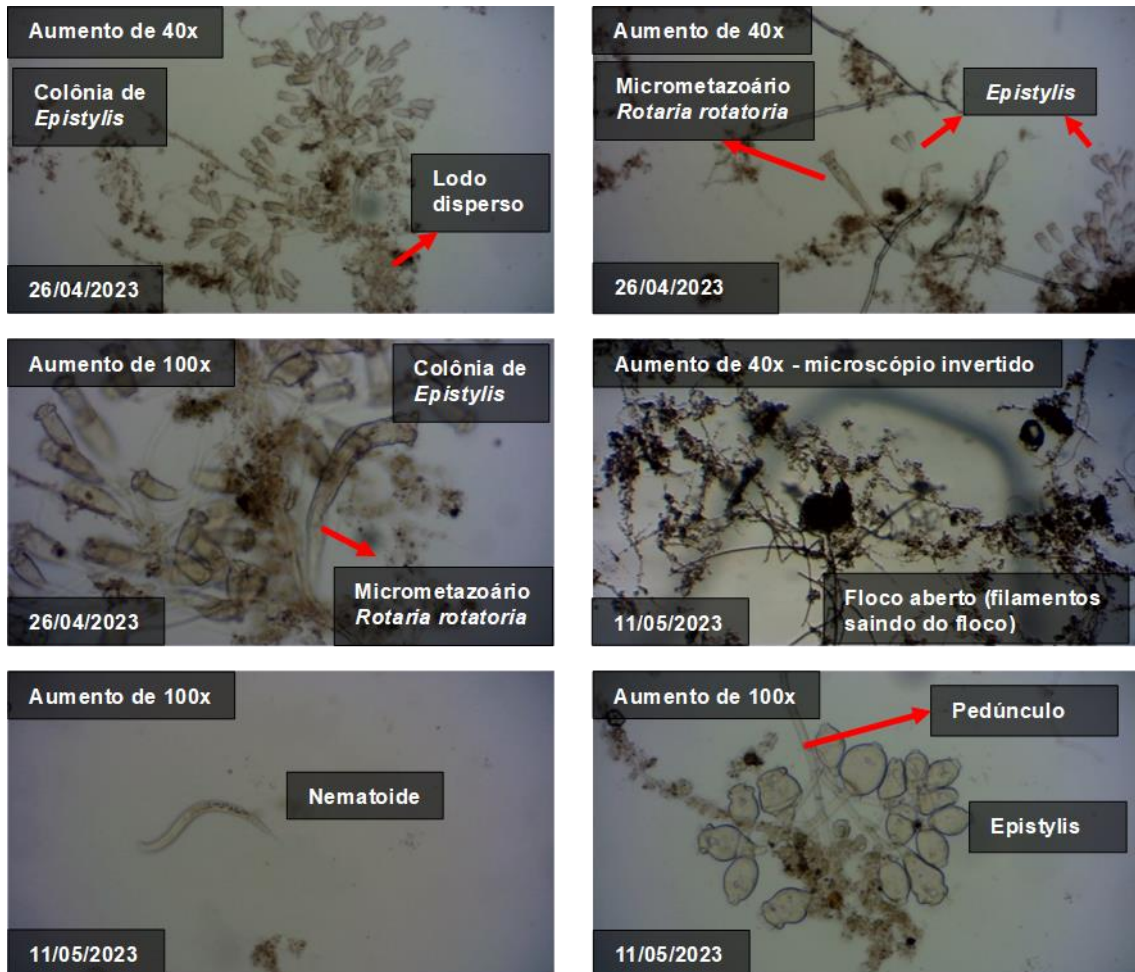
Na terceira análise a característica de baixa concentração de lodo foi mantida, não foram observados filamentos e foram encontradas colônias de *Epistylis*.

Por fim, na quarta e última análise, foram encontradas colônias de *Epistylis* e *Vorticella*, que foi encontrada nadando livremente em busca de floco para se fixar.

Apesar da presença de Rotíferos da espécie *Rotaria rotatoria*, assim como de *Vorticella* (indicadores de boa qualidade do lodo), a presença de *Epistylis* foi significativamente superior a esses organismos, sugerindo a necessidade de uma investigação mais aprofundada e a implementação de medidas corretivas para restaurar a saúde do sistema de tratamento de águas residuais.

A Figura 45 exhibe imagens do lodo ativado coletado na ETE 2.

Figura 45 – (a) Ampliação de 40x, com observação do floco e colônia de *Epistylis*; (b) Colônia de *Epistylis* e micrometazoário; (c) Colônia de *Epistylis* e micrometazoário; (d) floco observado pelo microscópio invertido em aumento de 40x; (e) Nematóide observado em aumento de 100x; e (f) Colônia de *Epistylis* em aumento de 100x.



Fonte: De autoria própria

É possível visualizar resumidamente, no Quadro 9, os resultados da avaliação da biomassa da ETE 2 e as potenciais medidas corretivas que podem ser implementadas para aprimorar o sistema de tratamento.

Quadro 9 – Problemas observados nas análises da biomassa da ETE 2 e medidas corretivas

Unidade do sistema	Problema observado	Medida corretiva
Motobombas de recalque de esgoto bruto	Baixa concentração de biomassa (SSV) no reator aeróbio	Instalar inversores de frequências em ambas as motobombas

Fonte: De autoria própria

5.3.3 Avaliação da eficiência de tratamento da ETE 2

Na Tabela 11, encontram-se as concentrações dos parâmetros de DBO, fósforo total e nitrogênio amoniacal, juntamente com as eficiências de remoção obtidas nas análises realizadas nos meses de janeiro, março e maio de 2023.

Tabela 11 – Concentrações e eficiências de remoção de DBO, fósforo e nitrogênio amoniacal

	DBO (mg/L)			P (mg/L)			NAT (mg/L)		
	Bruto	Tratado	Efic. (%)	Bruto	Tratado	Efic. (%)	Bruto	Tratado	Efic. (%)
jan/23	570,8	106,0	81%	4,74	3,81	20%	50,89	24,49	52%
mar/23	395,3	69,4	82%	6,00	2,89	52%	-	12,00	-
mai/23	334,4	103,7	69%	3,50	3,31	5%	-	11,52	-

Fonte: Retirado do laudo de análises da ETE 2

Considerando a média das análises de DBO no esgoto bruto em 2023, que foi de 433,5 mg/L, observa-se que está dentro das expectativas, semelhante ao valor utilizado no projeto para o dimensionamento do sistema. No entanto, a concentração média de DBO no esgoto tratado, que foi de 93,0 mg/L, apresenta um valor 365% acima do esperado, e a eficiência média de remoção de 77,3% está aproximadamente 18% abaixo do previsto, que era de 95,5% de eficiência de remoção. Além disso, é importante destacar que na análise de maio de 2023, esse parâmetro estava em desacordo com a Resolução CONSEMA nº 181/2023, que é a legislação estadual aplicável.

No que diz respeito ao fósforo total, não há exigência nas legislações aplicáveis, uma vez que o esgoto é lançado no sistema de drenagem pluvial, e o limite de 4,00 mg/L para o fósforo se aplica apenas ao lançamento em ambientes lânticos. Apesar disso, foram observadas concentrações inferiores a 4,00 mg/L, porém, com baixa eficiência de remoção desse nutriente. A média das três análises foi de 26%,

com destaque para março, com eficiência de remoção de 52%, e maio, com 5%. Esses resultados estão de acordo com as expectativas, uma vez que o sistema não foi projetado para remoção de fósforo.

No tocante ao nutriente nitrogênio amoniacal total, a legislação federal define um limite máximo de 20,00 mg/L, porém não há sanções diretas associadas a esse limite, sendo a fiscalização de sua conformidade de responsabilidade do órgão ambiental competente. Ao analisar os resultados obtidos, constata-se que a concentração média de nitrogênio amoniacal total no lançamento foi de 16,00 mg/L, e a eficiência de remoção só pôde ser calculada para o mês de janeiro, devido a alterações nas diretrizes do órgão ambiental responsável. É relevante ressaltar que a ETE foi projetada exclusivamente para o processo de nitrificação, o que implica que as concentrações de nitrato, um subproduto desse processo, possam estar elevadas. No entanto, essas concentrações não são monitoradas para determinar sua magnitude exata, embora em níveis elevados possam causar eutrofização em corpos d'água e afetar a qualidade da água potável.

6 CONCLUSÃO

Para garantir a máxima eficiência operacional da ETE, é fundamental contar com uma equipe de operação qualificada. A concepção do sistema desde a fase de projeto exerce uma influência direta na operação e eficiência da ETE. A operação das ETE baseadas em processos de lodos ativados está intimamente ligada aos equipamentos eletromecânicos instalados, sendo essencial que os equipamentos e componentes elétricos que permitem a automação do sistema estejam adequados às necessidades operacionais do sistema.

O monitoramento dos parâmetros de controle de processo, como SSVTA, IVL, OD, entre outros, pode ser uma alternativa viável para a operação do sistema, em substituição à avaliação do desempenho baseada exclusivamente em parâmetros como DBO, nitrogênio, fósforo, entre outros.

A respirometria tem se mostrado uma alternativa complementar às análises laboratoriais. Trata-se de um procedimento simples, de curta duração, que possibilita uma análise imediata dos processos metabólicos que ocorrem no sistema de tratamento. Além disso, fornece informações valiosas sobre a atividade biológica, a estabilidade e a eficiência do tratamento. Essa análise auxilia na otimização do processo de tratamento, no monitoramento de alterações operacionais e no diagnóstico de problemas, contribuindo para a melhoria da eficiência e do desempenho do sistema de tratamento de águas residuais.

A análise microscópica do lodo oferece uma visão detalhada da composição biológica e da saúde do sistema de tratamento, permitindo um monitoramento mais preciso e a adoção de medidas corretivas para otimizar o processo de tratamento de águas residuais.

Por fim, os sistemas de tratamento descentralizados apresentam-se como uma opção viável para o cumprimento das metas estabelecidas pelo PLANSAB. No município de Florianópolis, as ETE baseadas em processos de lodos ativados são amplamente difundidas para o tratamento de esgoto doméstico proveniente de condomínios residenciais, entretanto requerem atenção aos aspectos apresentados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9898: **Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores**. Rio de Janeiro, 1987. 34 p.

American Public Health Association (APHA); American Water Works Association (AWWA); Water Environment Federation (WEF). **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 20. ed. Washington: APHA, AWWA, WEF, 2005.

ANDREWS, J.F. Control systems for wastewater treatment plants. **Water Research**, 6, pp. 575-582. 1972.

ARCEIVALA, S.J. **Wastewater Treatment and Disposal: Engineering and Ecology in Pollution Control**. Marcel Dekker, New York. 892 p. 1981.

BRASIL. Lei nº 11445, de 05 de janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978.. **Lei Nº 11.445, de 5 de Janeiro de 2007**: Brasília, 05 jan. 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm. Acesso em: 17 abr. 2023.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Básico – SNS. **Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB**. Brasília, 2013.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto 2019**. Brasília, 2020a.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) – Relatório de Avaliação Anual 2018**. Brasília, 2020b.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 357, de 17 de Março de 2005**. Brasília, DF. 2005. Disponível em: https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altrd_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf. Acesso em: 04 mar. 2023.

BRASIL. **Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de Maio de 2011**. Brasília, DF. 2011. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2018/01/RESOLU%C3%87%C3%83O-No-430-DE-13-DE-MAIO-DE-2011.pdf>. Acesso em: 04 mar. 2023.

CAPODAGLIO, A. G.; CALLEGARI, A.; CECCONET, D.; MOLOGNONI, D. Sustainability of decentralized wastewater treatment technologies. **Water Practice and Technology**, 463–477. 2017. doi:10.2166/wpt.2017.055.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo -. **Guia Nacional de Coleta E Preservação de Amostras**: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. Brasília: Agência Nacional de Águas – ANA, 2011, 2011. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/Guia-nacional-de-coleta-e-preservacao-de-amostras-2012.pdf>. Acesso em: 15 maio 2023.

CHEN, Guang-Hao; VAN LOOSDRECHT, Mark C.M.; EKAMA, G.A.; BRDJANOVIC, Damir; MIKI, Marcelo Kenji. **Tratamento Biológico de Esgoto: princípios, modelagem e projeto**. 2. ed.: IWA Publishing, 2022.

CHERNICHARO, C.A.L.; RIBEIRO, T.B.; GARCIA, G.B.; LERMONTOV, A.; PLATZER, C.J.; POSSETTI, G.R.C.; ROSSETO, M.A.L.L. 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. <https://doi.org/10.4322/dae.2018.028>

COUTO, V. S. **Utilização de reatores híbridos de fluxo contínuo e em bateladas seqüenciais para remoção conjunta de carbono e nitrogênio de esgoto urbano**. **Dissertação de mestrado UFSC**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis – SC. 2007.

COSTA, A. G.; FERREIRA, A. F.; GUIMARÃES, P.; CATUNDA, S. Y. C.; Van HAANDEL, A. Respirimetria aplicada no sistema de lodo ativado. Influência de interrupções da oxigenação sobre a viabilidade e atividade de lodo ativado. In: **21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - ABES**, 2002.

ECKENFELDER, W.W.; GRAU, P. **Activated Sludge: Process Design and Control**. Technomic Publishing Co, Lancaster, EUA. 268 p. 1992.

FLANAGAN, M.J.; BRACKEN, B.D.; ROESLER, J.F. Automatic dissolved oxygen control. **J. Environ. Eng. Div., ASCE**, 103 (EE4), pp. 707-722. 1977.

FLORIANÓPOLIS. IMA. Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina. **NOVO RELATÓRIO DE BALNEABILIDADE TRAZ 123 PONTOS PRÓPRIOS PARA BANHO NO LITORAL CATARINENSE**. 2023a. Disponível em: <https://www.ima.sc.gov.br/index.php/noticias/2078-novo-relatorio-de-balneabilidade-traz-123-pontos-proprios-para-banho-no-litoral-catarinense>. Acesso em: 17 mar. 2023.

FLORIANÓPOLIS (Município). Orientação Técnica nº 09, de 02 de fevereiro de 2022. **Orientação Técnica: Padrões e Limites Para Lançamento Indireto de Sistemas de Tratamento de Esgoto Sanitário**. Florianópolis, SC, 02 fev. 2022. Disponível em: <https://www.pmf.sc.gov.br/entidades/vigsanitaria/index.php?cms=orientacoes+tecnicas&menu=4&submenuid=1662>. Acesso em: 17 abr. 2023.

FLORIANÓPOLIS. Prefeitura Municipal de Florianópolis. **Florianópolis tem público de 1,5 milhão de foliões no carnaval de 2023**. 2023b. Disponível em: <http://www.pmf.sc.gov.br/noticias/index.php?pagina=notpagina-i=25571>. Acesso em: 17 mar. 2023.

FERREIRA, Marcella Moretti *et al.* Systematic review of the last 20 years of research on decentralized domestic wastewater treatment in Brazil: state of the art and potentials. **Water Science And Technology**, [S.L.], v. 84, n. 12, p. 3469-3488, 9 nov. 2021. IWA Publishing. <http://dx.doi.org/10.2166/wst.2021.487>.

Fundo das Nações Unidas para a Infância – UNICEF e Organização Mundial da Saúde – OMS. **Progresso em Água Potável, Saneamento e Higiene Doméstica 2000–2017 Foco Especial nas Desigualdades**. Lançamento da versão em 12 de julho Relatório principal Progresso em Água Potável, Saneamento e Higiene, Nova Iorque, 2019.

GRAY, N.F. **Activated Sludge Theory and Practice**. Oxford, Oxford University Press, 1990. 272 p.

HENZE, M.; GRADY, C.P.L.; GUJER, W.; MARAIS, G.V.R.; MATSUO, T. Activated sludge Model No 1. **IAWPRC Scientific and Technical Reports No 1**. London UK. 1987.

HOFFMANN, Heike. **Caracterização do funcionamento de ETE de tipo lodo ativado via imagem microscópica - Estudo na região da Grande Florianópolis**. Florianópolis: XI SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2004.

HORAN, N.J. **Biological wastewater treatment systems. Theory and operation**. John Wiley & Sons, Chichester. 320 p. 1990.

IBGE. **Cidades e Estados**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/florianopolis.html>. Acesso em: 17 mar. 2023.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSOA, Constantino Arruda. **Tratamento de esgotos domésticos**. 3. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1995. xxxii, 683 p. ISBN 8570221193.

KLAUS, Giliane Feital. **ESTUDO DE UM SISTEMA COMPACTO DE TRATAMENTO DE EFLUENTES SANITÁRIOS DO TIPO LODOS ATIVADOS**. 2012. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

KÖNIG, A. Capítulo 3. Biologia das lagoas. Algas. IN: MENDONÇA, S.R. **Lagoas de estabilização e aeradas mecanicamente: novos conceitos**. João Pessoa. 385 p. 1990.

LAPOLLI, Flávio Rubens; BARCIA, Ricardo Miranda. **Sistema especialista difuso para controle de estações de tratamento de esgotos pelo processo de lodos ativados**. 1993. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa

Catarina. Centro Tecnológico. Disponível em:
<http://www.bu.ufsc.br/teses/PEPS0125-D.pdf>

LOHMANN, J.; SCHLEGEL, S. Measurement and control of the MLSS concentration in activated sludge plants. **Water Sci. Technol.**, 13, p. 217-224.

LUDZACK, F.T. e ETTINGER, M.B. **Controlling Operation to Minimize Activated Sludge Effluent Nitrogen**. J. WPCF, 34, 9, 9290-931. 1962.

LUMBERS, J.P. Improving the efficiency of the process. Future research and objectives for control in the water industry. In: SERC. **Water and waste research. The way ahead.**. Proceedings of a seminar, Imperial College, Londres, 17-18 Junho 1981.

MEDEIROS, U. T. P.; CAVALCANTI, P. F. F.; VAN HAANDEL, A. **Uso da respirometria para determinar a cinética de nitrificação em sistemas de lodo ativado**. Gestão e tratamento de resíduos líquidos gerados na cadeia produtiva do petróleo. 1 ed. Recife: Editora universitária, v. 1, p. 119-133, 2006.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MOTA, S.; VON SPERLING, M. (coord). **Nutrientes de esgoto sanitário: Utilização e remoção**. Rio de Janeiro: PROSAB/FINEP. 430 p. 2009.

PROSAB – **Programa de Pesquisa em Saneamento Básico**: Conservação de Água e Energia. Desenvolvimento e avaliação de processos para o uso de fontes alternativas de água visando à sua conservação. Luiz Sérgio Philippi (Coordenador). ABES: Rio de Janeiro, 2009.

Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), Programa Mundial de Avaliação da Água – PMAA. **Relatório Mundial de Desenvolvimento da Água das Nações Unidas 2019: Não deixando ninguém para trás**. Paris, 2019.

SANTA CATARINA. **ENUNCIADO Nº 01, de 26 de Janeiro de 2023**. Florianópolis, SC. 2023. Disponível em: <https://in.ima.sc.gov.br/home/enunciados>. Acesso em: 04 mar. 2023.

SANTA CATARINA. **Portaria FATMA Nº 017, de 18 de Abril de 2002**. Florianópolis, SC. 2002. Acesso em: 04 mar. 2023.

SANTA CATARINA. **Resolução CONSEMA Nº 181, de 02 de Agosto de 2021**. Florianópolis, SC, 19 abr. 2022a. Disponível em: <https://www.sde.sc.gov.br/index.php/biblioteca/consema/legislacao/resolucoes/2021-1/2162-resolucao-consema-n-181-2021-1/file>. Acesso em: 04 mar. 2023.

SANTA CATARINA. **Resolução CONSEMA Nº 182, de 06 de Agosto de 2021**. Florianópolis, SC, 13 abr. 2022b. Disponível em:

<https://www.sde.sc.gov.br/index.php/biblioteca/consema/legislacao/resolucoes/2021-1/2163-resolucao-consema-n-182-2021-1/file>. Acesso em: 04 mar. 2023.

SANTOS, Silvânia Lucas dos; MINÁ, Vanessa Gomes; CATUNDA, Sebastian Yuri Cavalcanti; VAN HAANDEL, Adrianus Cornelius. Influência da concentração de lodo sobre o consumo de energia para aeração em sistemas de lodo ativado.

Engenharia Sanitaria e Ambiental, [S.L.], v. 22, n. 3, p. 437-444, maio 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017121436>.

SCHMIDELL, W. In: *Biotecnologia Industrial. Agitação e aeração em Biorreatores*. 1 ed. Editora Edgard Blücher Ltda. São Paulo, v.2, p. 277-331. 2001.

SILVA, S.A., MARA, D.D. **Tratamentos biológicos de águas residuárias: lagoas de estabilização**. ABES, Rio de Janeiro, 140 p. 1979.

SUBTIL, E. L., SANCHEZ, A. A.; CAVALHERO, A. In: Mantovani, W., de Oliveira Cardoso; Benassi, A. R. F.; Subtil, E. L. (eds). **Ciência E Tecnologia Ambiental: Conceitos E Perspectivas**, 201–220. Editora UFABC, Santo André, 2016.

TCHOBANOGLIOUS, G.; SCHROEDER, E.D. **Water quality: characteristics, modeling, modification**. Addison-Wesley, Reading, MA. 1985.

TONETTI, Adriano Luiz *et al.* **TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS EM COMUNIDADES ISOLADAS**: referencial para a escolha de soluções. Campinas: Biblioteca Unicamp, 2018. Disponível em: <https://www.fecfau.unicamp.br/~saneamentorural/wp-content/uploads/2018/11/Livro-Tratamento-de-Esgotos-Dom%c3%a9sticos-em-Comunidades-Isoladas-ilovepdf-compressed.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2023.

VAN HAANDEL, A. C.; CATUNDA, P. F. C. Determinação da taxa de consumo de oxigênio em sistemas de tratamento de esgoto. **Revista Engenharia Sanitária**. 21, 4, pp.481-488. 1982.

VAN HAANDEL, A.C., LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgotos. Um manual para regiões de clima quente**. 1994.

VON SPERLING, M. *Lodos Ativados – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*, v.4. 4.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade de Minas Gerais, 2016a.

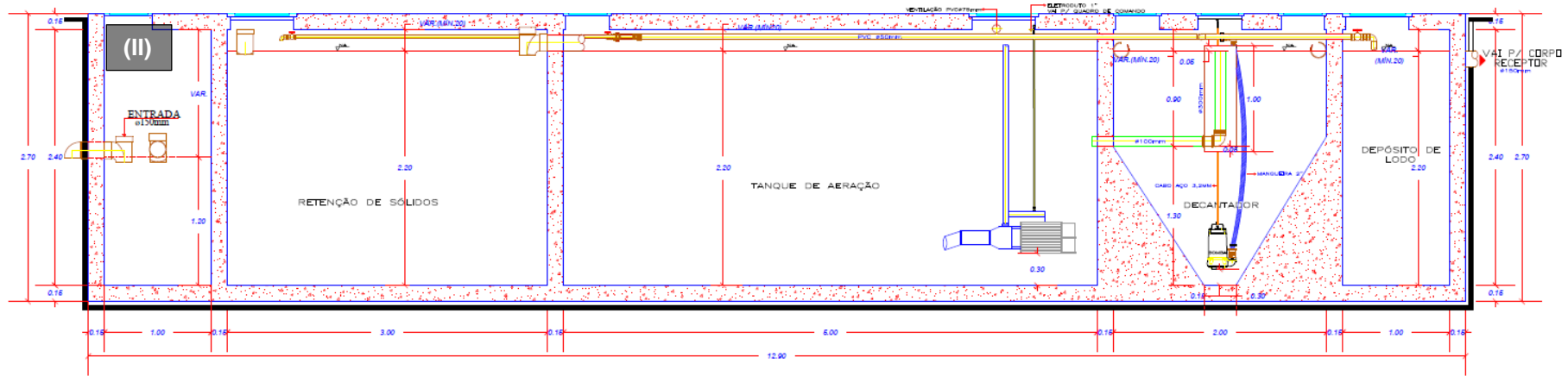
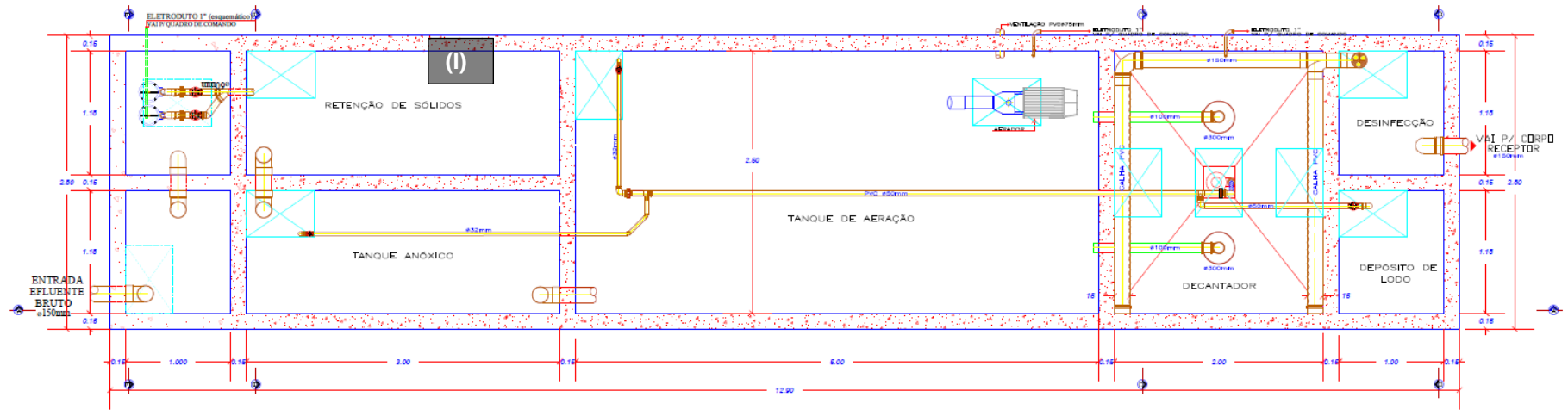
VON SPERLING, M. *Princípios básicos do tratamento de esgotos – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias*, v.2. 2.ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade de Minas Gerais, 2016b.

VON SPERLING, M.; LUMBERS, J.P. **Controle operacional e otimização de custos em sistemas de aeração prolongada**. In: 21º CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Rio de Janeiro, 18-23 Setembro 1988. p. 171-191.

WOLFF, D. B. **Remoção biológica de carbono e nitrogênio de esgoto urbano em reatores híbridos utilizando dois materiais suporte flotantes**. Tese de Doutorado UFSC. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Florianópolis – SC. 2005.

WPCF & ASCE. **Aeration. A wastewater treatment process**. Manual of Practice FD-13 (WPCF), Manuals and reports on engineering practice, n. 63 (ASCE). 167 p. 1988.

ANEXO A – (I) PLANTA BAIXA DA ETE 1; E (II) PERFIL HIDRÁULICO DA ETE 1



ANEXO B – (I) PLANTA BAIXA DA ETE 2; E (II) PERFIL HIDRÁULICO DA ETE 2

