UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

BÁRBARA BEATRIZ DE OLIVEIRA FERREIRA
RUBIA REGINA CABRAL

DESEMPENHO DE REATOR BIOLÓGICO DE LEITO MÓVEL SEGUIDO POR FLOTAÇÃO NO PÓS-TRATAMENTO EM ESCALA REAL NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO VERDE EM PONTA GROSSA-PR

PONTA GROSSA
2022

BÁRBARA BEATRIZ DE OLIVEIRA FERREIRA

RUBIA REGINA CABRAL

DESEMPENHO DE REATOR BIOLÓGICO DE LEITO MÓVEL SEGUIDO POR FLOTAÇÃO NO PÓS-TRATAMENTO EM ESCALA REAL NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO VERDE EM PONTA GROSSA-PR

Trabalho de conclusão de curso apresentado à disciplina de OTCC como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil, da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Magdalena Ribas Döll

PONTA GROSSA

2022

BÁRBARA BEATRIZ DE OLIVEIRA FERREIRA
RUBIA REGINA CABRAL

DESEMPENHO DE REATOR BIOLÓGICO DE LEITO MÓVEL SEGUIDO POR FLOTAÇÃO NO PÓS-TRATAMENTO EM ESCALA REAL NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO VERDE EM PONTA GROSSA-PR

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Ponta Grossa, 14 de dezembro de 2022.

BANCA EXAMINADORA:

_____

Profa. Dra. Maria Magdalena Ribas Döll

Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

_____

Prof. Dr. Guilherme Araújo Vuitik
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa

_____

Profa. Dra. Ana Cláudia Barana
Departamento de Engenharia de Alimentos – Universidade Estadual de Ponta Grossa

Dedicamos esse trabalho aos nossos pais, Regina, Sedinei e Luiza, que com tanto esmero fizeram o impossível para chegarmos até aqui.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que nos permitiu vivenciar cada momento, nos guiando com sabedoria e força, não nos deixando desistir.

À nossa família, pais e irmãos, que caminharam conosco durante essa longa jornada, sempre nos dando apoio e nos incentivando, sem vocês nada disso seria possível.

Eu, Rubia, agradeço ao meu esposo Anderson, por ser meu maior encorajador e meu conforto e à minha filha Agnes, pela compreensão nos momentos de ausência.

Eu, Bárbara, agradeço por cada amigo que fez parte da minha trajetória desde antes de iniciar esse curso, minha família escolhida e meu alicerce, sendo uma parte deles representado por Deverlly Lamoglia, Kamyla Ferraz Leal, Rubia Catarina Przybysz, Gianne Roberta Schiavon, Bryan Brito, Amanda Xavier, Laura Elis Silva, Giulia Campos, Bruno Kobay e Lorena Schafranski, mas em especial Alyson Ernani Gomes *(in memoriam),* meu primeiro amigo e incentivador da UEPG, que tenho certeza que se orgulharia da minha trajetória e estaria comemorando junto comigo. À Rafaela Marcon Gomes Vaz, companheira do Alyson e minha amiga de infância por me aproximar tanto de Deus e sempre ter uma palavra de ânimo para mim. À Leticia Degraf Rosas e Ioná Aumondes por dedicarem seu tempo e trabalho pra cuidar de mim e me tornar uma pessoa melhor, vocês foram essenciais no meu caminho.

À todos os nossos professores, em especial nossa orientadora Profª Drª Maria Magdalena Ribas Döll pelos ensinamentos, pela paciência e principalmente pelo incentivo.

Ao Prof. Dr. Guilherme Araújo Vuitik e a Prof. Dr. Ana Claudia Barana que compõe a banca avaliadora e com seus conselhos acrescentaram muito ao desenvolvimento do trabalho.

Aos colaboradores Liane Karine Boff, Diogo Inglês Zarpellon, José Geraldo Machado Filho pela ajuda indispensável e pela troca de experiências.

À Companhia de Saneamento do Paraná por ceder dados internos e a possibilidade de visitas técnicas importantes para a realização da pesquisa.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa, por nos proporcionar um ambiente agradável e repleto de oportunidades. Agradecemos à cada membro do corpo docente, à direção e administração dessa instituição de ensino.

Por fim, somos gratas uma à outra por termos chegado tão longe mesmo com tantas adversidades no caminho, e por sempre se manter firmes e confiantes de que esse dia chegaria. Valeu a pena!

“Tudo o que fizerem, seja em palavra ou em ação, façam-no em nome do Senhor Jesus, dando por meio dele graças a Deus Pai.”

Colossenses 3:17

RESUMO

Devido à expansão urbana na cidade de Ponta Grossa houve um aumento significativo da quantidade de esgoto produzido pela população, sendo necessário que as estações de tratamento de esgoto sejam aprimoradas para aumentar a remoção de matéria orgânica carbonácea e nitrogenada. Uma das tecnologias que pode ser usada no aprimoramento é o Reator de Biofilme de Leito Móvel que consiste na utilização de biomassa aeróbia e anóxica aderida a um meio suporte. O presente trabalho teve como objetivo, analisar o desempenho da Estação de Tratamento de Esgoto Verde na cidade de Ponta Grossa, Paraná, local onde, recentemente, foi instalado um reator deste tipo seguido por flotação. Além do desempenho da estação, almejou-se comparar parâmetros obtidos anteriormente e posteriormente a instalação desse novo sistema. Para isso, foram realizadas visitas técnicas e foram analisados dados de monitoramento obtidos durante um período de 3 a 4 meses de funcionamento da estação operada pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR). Conclui-se que o tratamento do efluente do reator anaeróbio foi adequado tanto com a lagoa de estabilização como com o MBBR e flotador, sendo a melhora na eficiência de remoção de DBO em 6,8%, de DQO em 7,7% e remoção de sólidos sedimentáveis em média de 98,8%, destacando-se como vantagem, o sistema feito em módulos, o que possibilita o transporte e/ou ampliação, de acordo com as necessidades imediatas, além do controle de odor; como desvantagem, identificou-se o custo operacional, considerando o aumento destes, após a instalação do reator, sendo o aumento de energia elétrica em cinco vezes e o aumento médio de 46% na produção de lodo.

Palavras-chave: MBBR; Reator de Biofilme de Leito Móvel; Tratamento de Esgoto, ETE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Primeiro sistema de coleta e tratamento de esgotos em Curitiba, Paraná 188
Figura 3.2 - Sistema de coleta e tratamento de esgotos denominado “Instalações Bacterianas” 19
Figura 3.3 - Mapa de Bacias Hidrográficas Urbanas de Ponta Grossa 211
Figura 3.4 - Sólidos no esgoto 233
Figura 3.5 - Sistema de esgotamento sanitário do tipo a) unitário e b) Sistema absoluto... 244
Figura 3.6 - Tratamento Preliminar de uma ETE composto por grade, caixa de areia e medidior de vazão 26
Figura 3.7 - Biomídia utilizada no MBBR a) fotografia frontal e b) fotografia lateral..... 3030
Figura 3.8 - Princípio de funcionamento do MBBR em reator a) de sistema aeróbio e b) de sistema anóxico 30
Figura 3.9 - Formação do biofilme 32
Figura 3.10 - Tanque de flotação com uso de vaso saturador 34
Figura 3.11 - Distribuição dos sólidos do esgoto bruto em termos de concentração 3737
Figura 3.11 - Ciclo do nitrogênio 39
Figura 4.1 - Localização da ETE Verde no estado do Paraná e no município de Ponta Grossa 43
Figura 4.2 - Estruturas observadas na ETE Verde pelo Google Earth, imagem vista em planta..... 44
Figura 4.3 - Fotografias do Tratamento preliminar da ETE Verde – canal principal, extravasor de vazão e grades. 45
Figura 4.4 - Fotografias do Tratamento preliminar da ETE Verde – desarenadores e calha Parshall..... 46
Figura 4.5 - Fotografias do Tratamento secundário da ETE Verde – Reatores anaeróbios tipo RALF seguidos por lagoa facultativa..... 46
Figura 4.6 - Ilustração dos dois sistemas de desague de lodo da ETE Verde a) em leitos de secagem e b) por centrifugação seguido de caleação 47
Figura 4.7 - Fluxograma do sistema antigo de tratamento de esgoto na ETE Verde..... 48
Figura 4.8 - Fluxograma do novo sistema em implantação e objeto do estudo 48
Figura 4.9 - Sistema MBBR seguido de tratamento físico-químico 49
Figura 5.1 - Aspersores de água..... 57

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Quadro sobre vantagens e desvantagens do uso do flotador..... 32
Quadro 3.2 – Descrição dos tipos de caracterização de sólidos totais..... 36

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 - Gráfico de demonstração da evolução anual de número de ligações de esgoto existentes no município de Ponta Grossa 220
Gráfico 5.1 - DBO do afluente e do efluente 58
Gráfico 5.2 - Eficiência da remoção da DBO em % 59
Gráfico 5.3 - DQO do Afluente, Média dos Reatores e Efluente final 60
Gráfico 5.4 - Eficiência na remoção de DQO em % 61
Gráfico 5.5 - Evolução do pH 62
Gráfico 5.6 - Evolução dos valores de Sólidos Sedimentáveis 64
Gráfico 5.7 - Evoluções dos valores de Sólidos Sedimentáveis do Efluente Final 65
Gráfico 5.8 - Eficiência da remoção de SS (%) 66
Gráfico 5.9 - Evolução dos sólidos suspensos totais (SST) 67
Gráfico 5.10 - Evolução dos valores de SST no Efluente Final 68
Gráfico 5.11 - Eficiência na remoção de SST (%) 69
Gráfico 5.12 - Variação da temperatura 70
Gráfico 5.13 - Variação da vazão (L/s) 71
Gráfico 5.14 - Precipitação Acumulada 72
Gráfico 5.15 - Comparação entre precipitação acumulada e vazão da ETE 73
Gráfico 5.16 - Variação das temperaturas do ar 74
Gráfico 5.17 - Precipitação total mensal em Ponta Grossa - PR 74
Gráfico 5.18 - Consumo energético da ETE 75
Gráfico 5.19 - Gasto com energia elétrica na ETE 75
Gráfico 5.20 - Produção de lodo 77

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Valores de referência para interpretação dos valores de correlação 51
Tabela 5.1 - Variação do pH do Afluente, RALF e Efluente..... 62
Tabela 5.2 - Consumo Energético de cada unidade do sistema 76

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 15

2 OBJETIVOS 17

2.1 Objetivo geral 17

2.1.1 Objetivos específicos 17

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18

3.1 HISTÓRICO DO SANEAMENTO NO ESTADO DO PARANÁ E ETE VERDE 18

3.2 SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO 21

3.3 TRATAMENTO DE ESGOTO E UNIDADES OPERACIONAIS DE UMA ETE 24

3.3.1 Tratamento Preliminar 25

3.3.2 Tratamento Primário 26

3.3.3 Tratamento Secundário 26

3.3.4 Lagoas de Estabilização 28

3.3.5 MBBR 28

3.3.6 Flotação 32

3.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS 34

3.4.1 Sólidos 36

3.4.2 Indicadores de Matéria Orgânica 37

3.4.3 Nitrogênio 38

3.4.4 Fósforo 39

3.4.5 pH 40

3.4.6 Indicadores de Contaminação Fecal 40

3.5 LODO 41

4 METODOLOGIA 43

4.1 DESCRIÇÃO DA ETE VERDE EM PONTA GROSSA, PARANÁ 43

4.2 DETALHAMENTO DAS UNIDADES OPERACIONAIS DA ETE VERDE 45

4.3 OBJETO DE ESTUDO 47

4.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS 49

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 52

5.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO COMPLEMENTAR E DAS UNIDADES OPERACIONAIS MBBR E FLOTADOR 52

5.1.1 ELEVATÓRIA DE RECUPERAÇÃO DE NÍVEL 53

5.1.2 SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO COMPLEMENTAR 53

5.1.3 REATOR BIOLÓGICO AERÓBIO (MBBR) 53

5.1.4 TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO APÓS O MBBR 54

5.1.5 Aspersores 56

5.2 MONITORAMENTO DO DESEMPENHO DA ETE VERDE COM OS DOIS TIPOS DE PÓS-TRATAMENTO DO RALF: LAGOA DE ESTABILIZAÇÃO E O MBBR SEGUIDO POR FLOTAÇÃO 57

5.2.1 DBO 57

5.2.2 DQO 59

5.2.3 pH 61

5.2.4 Sólidos Sedimentáveis 63

5.2.5 Sólidos Suspensos Totais 66

5.2.6 Temperatura de efluente 69

5.2.7 VAZÃO 70

5.2.8 AVALIAÇÃO DE INFLUÊNCIA DE TEMPERATURA E CHUVA 73

5.3 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA ETE 75

5.4 PRODUÇÃO DE LODO 77

6 CONCLUSÃO 78

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 80

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os principais processos utilizados no tratamento de esgoto eram as lagoas facultativas, filtros aeróbios, reatores anaeróbios e aeróbios. (TIRABOSCHI, 2004). Porém, o uso de tecnologias para um tratamento mais rápido, eficiente, e principalmente compacto, é indispensável, pois com a urbanização tem-se cada vez menos espaço nas grandes cidades. (BLOG, 2019).

Com o marco regulatório do saneamento básico pela Lei nº 14.026 (BRASIL, 2020) se prevê a universalização do fornecimento de água, coleta e tratamento de esgoto no Brasil até 2033, agregando assim, a importância de modernização do sistema atual. Segundo o Professor José Carlos Mierzwa, do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), faz-se necessário um aperfeiçoamento dessas tecnologias para melhorar a qualidade dos corpos hídricos e reduzir o risco de doenças transmitidas pela água. (MIERZWA, 2020).

Conforme citado na terceira revisão do Plano Municipal de Saneamento Básico de Ponta Grossa/PR (2019), o sistema de esgotamento da cidade conta com redes coletoras, ligações, 20 estações elevatórias de esgotos sanitários (EEE) espalhadas pelo município e 10 estações de tratamento de esgoto, com capacidade nominal total de 650,5 L/s, suficiente para atender a demanda atual. Dentro do sistema da cidade, o índice de atendimento da população urbana em 2019 era de 90,32%.

Em visita técnica, colheu-se a informação de que a ETE Verde é considerada a maior estação de tratamento de esgoto de Ponta Grossa/PR e está em operação desde 1983. A ETE é responsável pelo atendimento de cerca de 126 mil pessoas, ou seja, aproximadamente 40% da população atual, e, possui uma vazão nominal de 280 L/s. Recentemente, na ETE Verde foram instaladas unidades modulares para aprimoramento do sistema que contava com tratamento preliminar, reatores anaeróbios e lagoa de estabilização. Estes sistemas não estavam atendendo às exigências ambientais quanto a qualidade de efluentes tratados.

Segundo informações da Sanepar (2021), os módulos instalados no ano de 2021 consistem em um Reator de Biofilme de Leito Móvel e unidades de tratamento físico-químico sequencialmente após o tratamento do esgoto por reator anaeróbio do tipo RALF (Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado). O Reator de Biofilme de Leito

Móvel, conhecido no meio técnico como MBBR (do inglês, *Moving Bed Biofilm Reactor*) baseia-se no uso de biofilmes aderidos em meios suportes ou biomidias plásticas para degradar matéria orgânica e remover nutrientes. Esta tecnologia permite o tratamento de altas cargas de esgoto doméstico ou industriais em plantas de áreas relativamente pequenas. (OLIVEIRA, 2015).

Também em visita técnica ao local, colheu-se a informação de que, em 2022, na ETE Verde após o tratamento preliminar e tratamento por reatores anaeróbios, estão em operação concomitante os dois sistemas de tratamento: lagoa de estabilização e o MBBR seguido por flotação, de modo que a vazão após o tratamento anaeróbio é dividida e direcionada para cada um dos sistemas e o efluente final é então disposto no Rio Verde.

No caso da ETE Verde, o MBBR é sucedido de flotação, que consiste na remoção de sólidos em suspensão e que, quando combinado com agentes coagulantes, pode remover nutrientes e parcela da matéria orgânica dissolvida. Na flotação por ar dissolvido as microbolhas de ar empurram para a superfície o lodo previamente coagulado e floculado em câmaras de coagulação e de floculação que precedem o flotador. Assim, na superfície do flotador o lodo é removido mecanicamente pelas pás raspadoras. (CHERNICHARO, 1995).

1.1 JUSTIFICATIVA

Diante da importância do tema com relação a processos de tratamentos de esgotos que usem tecnologias mais modernas, que visem não somente a remoção de matéria orgânica, mas também de nutrientes, que gerem subprodutos sustentáveis, que tenham menor impacto no meio ambiente e em menor área, faz-se necessário o aprofundamento de estudos que melhor embasem a tomada de decisão das companhias de saneamento no aprimoramento das estações.

Observa-se que há tendência de que sejam instaladas nas ETE já operantes sistemas de processos biológicos avançados como alternativa para estações mais compactas como pós-tratamento de reatores anaeróbios. Assim, avaliar o desempenho de um sistema como o MBBR seguido por flotação no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbio que tenha sido recentemente instalado é importante para avaliar questões como nuances operacionais, impacto ambiental quanto a eficiência de remoção de matéria orgânica e de subprodutos gerados no processo,

dificuldades encontradas, necessidade de adaptações.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

A presente pesquisa tem como objetivo geral, avaliar o desempenho das unidades operacionais implantadas em 2021 na estação de tratamento de esgoto Verde de Ponta Grossa, Paraná. Estas unidades que foram instaladas para o aprimoramento do tratamento e consistem na implantação de um reator biológico de leito móvel (MBBR) seguido por flotação.

2.1.1 Objetivos específicos

a) Estudar e elaborar uma descrição fidedigna do sistema recém implantado na ETE Verde quanto as unidades operacionais e os processos operacionais envolvidos até o momento.
b) Realizar o monitoramento qualitativo do efluente final após o tratamento de esgoto pelo MBBR seguido pelos processos físicos e químicos, coagulação-floculação-flotação;
c) Realizar o monitoramento qualitativo do efluente final após o tratamento de esgoto pelo reator anaeróbio de leito fluidizado (RALF) seguido pela lagoa de estabilização;
d) Comparar a qualidade do efluente entre os dois tipos de pós-tratamento do RALF, sendo a lagoa de estabilização e o MBBR seguido por flotação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 HISTÓRICO DO SANEAMENTO NO ESTADO DO PARANÁ E ETE VERDE

A primeira obra de saneamento básico no Brasil é datada de 1561, quando o militar português Estácio de Sá mandou escavar o primeiro poço para abastecer a cidade do Rio de Janeiro. (BARROS, 2014). Porém, só no século XIX, com a generalização da distribuição de água encanada e de instalações sanitárias com presença de descarga d'água, é que a água passou a ser utilizada com a finalidade de afastar dejetos de casa, ocasionando a saturação das fossas sépticas, infectando assim as ruas e os lençóis freáticos. (COSTA, 2010).

A solução do problema supracitado foi canalizar os esgotos domésticos e industriais para galerias pluviais já existentes, criando assim o Sistema Unitário de Esgotos, onde todos os esgotos e águas pluviais eram combinados em uma só canalização e lançados em rios e lagos receptores. (MUMFORD, 1998).

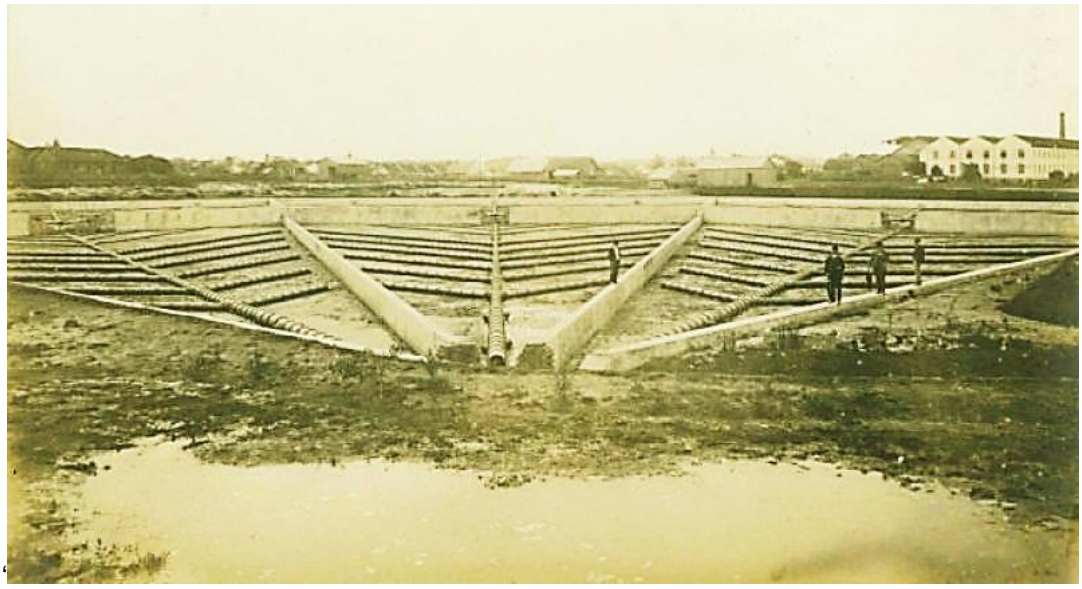
A história do saneamento básico no Paraná inicia no século XIX, mas apenas em 1908 é criado o primeiro sistema de coleta e tratamento de esgotos denominado de “instalação bacteriana de esgoto”, localizado em Curitiba, onde atualmente encontra-se a sede da Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR, anteriormente chamada de Companhia de Água e Esgotos do Paraná – AGEPAR. (SANEPAR, 2022). Na Figura 3.1, apresenta-se o primeiro sistema de coleta e tratamento de esgotos.

Figura 3.1 - Primeiro sistema de coleta e tratamento de esgotos em Curitiba, Paraná

Fonte: SANEPAR (2022).

Já na Figura 3.2, está sendo apresentado o sistema de coleta e tratamento de esgotos denominado “Instalações Bacterianas”.

Figura 3.2 - Sistema de coleta e tratamento de esgotos denominado “Instalações Bacterianas”



Fonte: SANEPAR (2022).

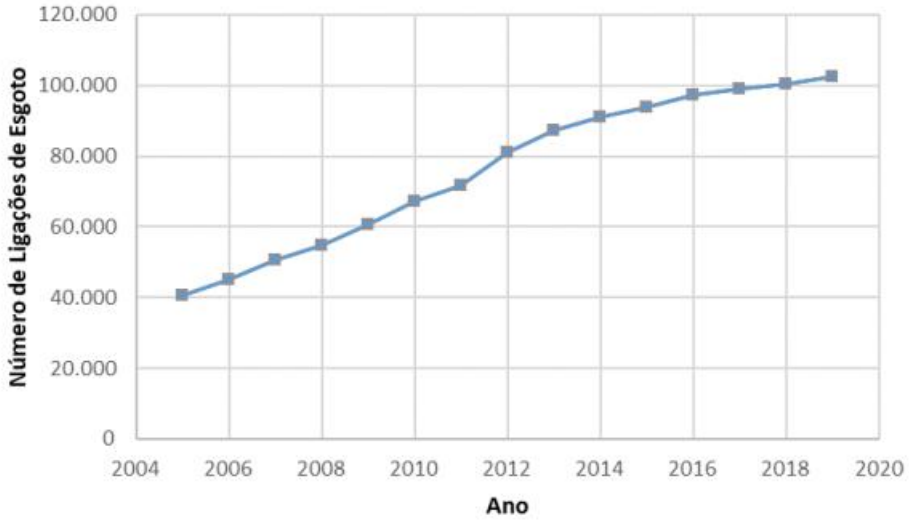
Em 1928 é criado o Departamento de Água e Esgotos (DAE), a partir de então, o saneamento básico do Estado ganha impulso com a instalação das seções de água e esgotos no interior do estado, sendo os munícipios contemplados de Ponta Grossa (1934), Jacarezinho (1938), Cambará (1941), Irati (1942) e Morretes (1942). (SANEPAR, 2022).

A ETE Verde entrou em operação no ano de 1983 possuindo apenas uma lagoa de estabilização facultativa para o tratamento dos efluentes. No ano de 1986 foram implantados três reatores de manta de lodo do tipo RALF, da SANEPAR. (WAGNER, 2015). Já em 2011, a ETE passa por mais uma ampliação com o acréscimo do quarto RALF, instalado para suprir o aumento de demanda da estação. (WAGNER, 2015).

Em 2020 foram iniciadas as obras para instalação do MBBR seguido de coagulação-floculação-flotação e centrifugação para aglomeração do lodo gerado, tornando assim a qualidade do efluente final melhor para disposição no rio. (SANEPAR, 2021). O sistema de esgotamento sanitário de Ponta Grossa, em 2019,

atendia cerca de 91,22% de toda a população, aproximadamente 351.736 habitantes, em sua maioria domicílios residenciais, sendo possível relatar o aumento anual das ligações de esgoto no município, conforme mostra o Gráfico 3.1. (PMSB, 2019).

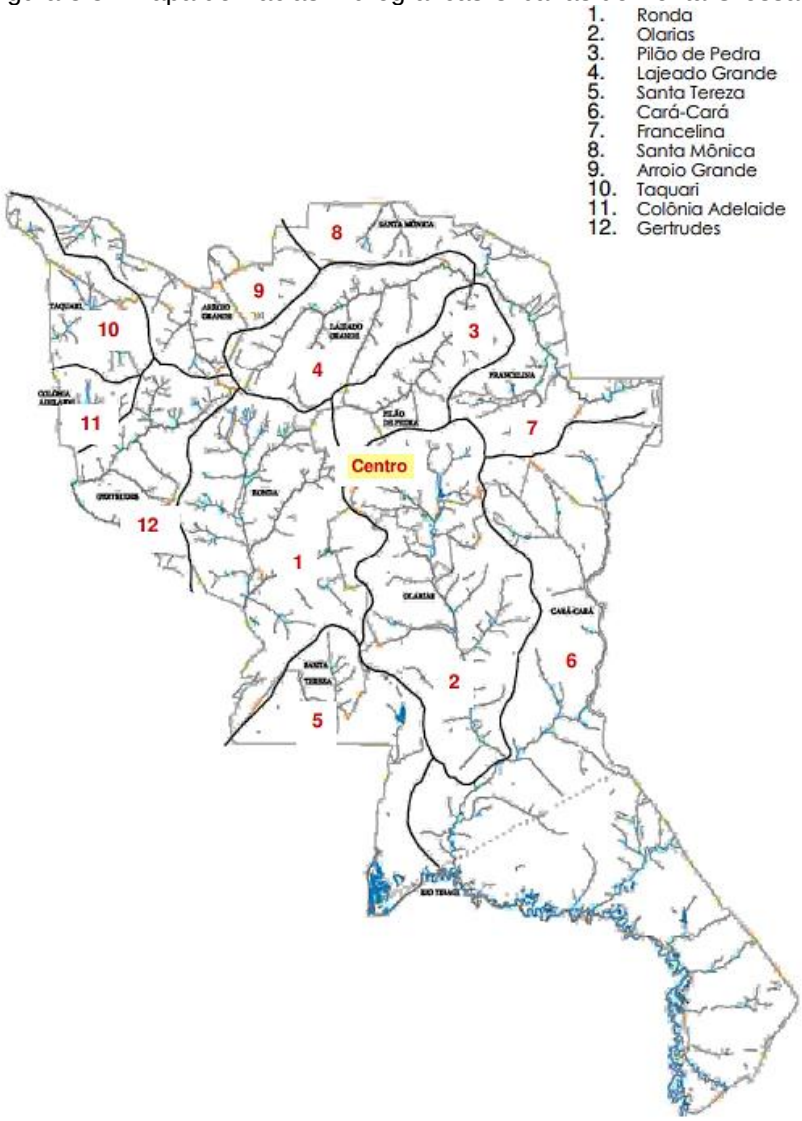
Gráfico 3.1 - Gráfico de demonstração da evolução anual de número de ligações de esgoto existentes no município de Ponta Grossa



Fonte: SANEPAR/SISWEB (2019).

A composição do sistema municipal ponta-grossense conta com 1.821.590 metros de rede coletoras de esgotos sanitários, 100.485 ligações na zona urbana, 20 estações elevatórias, sendo que as respectivas linhas de recalque possuem extensão acumulada de 23.021 metros. (PMSB, 2019). As 10 estações de tratamento são denominadas por Gertrudes, Tibagi, Cristo Rei, Ronda, Verde, Olarias, Congonhas, Cará-Cará, Taquari e Santa Bárbara. Com uma capacidade nominal total de 650,5 L/s suficiente para atender a demanda atual, essas estações foram alocadas nos pontos mais baixos das sub-bacias hidrográficas do município, como representa a Figura 3.3. (PMSB, 2019). Estas sub-bacias foram enumeradas de 1 a 12, com seus nomes sendo representados no canto superior direito da Figura 3.3.

Figura 3.3 - Mapa de Bacias Hidrográficas Urbanas de Ponta Grossa



Fonte: IPLAN - Ponta Grossa; **Plano Diretor:** hidrografia - Bacias e sub-bacias.

3.2 SISTEMA DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO

Segundo a Lei Nº 14.026, de 15 de julho de 2020, no Artigo 3º, saneamento básico é o conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais de abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, drenagem e manejo de águas pluviais urbanas. (BRASIL, 2020).

Outrossim, a Organização Mundial de Saúde (OMS), conceitua saneamento como controle de todos os fatores do meio físico do homem, os quais exercem ou podem exercer efeitos nocivos sobre o bem estar físico, mental e social. Além disso,

afirma que saneamento caracteriza o conjunto de ações socioeconômicas que têm por objetivo alcançar Salubridade Ambiental.

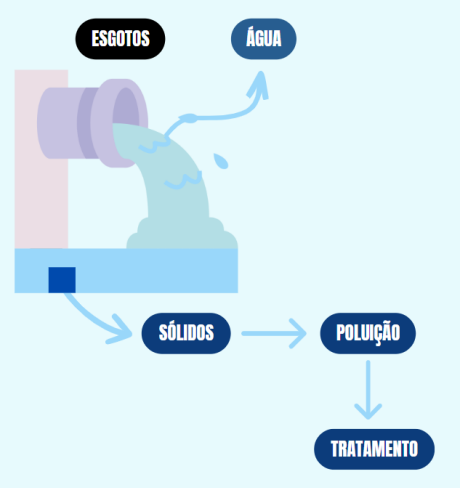
Por sua vez, esgotamento sanitário é constituído por atividades operacionais necessárias para a coleta, transporte, tratamento e à disposição final adequadas dos esgotos sanitários, desde o local produtor até sua destinação final. (BRASIL, 2020). Sendo assim, tendo um sistema corretamente dimensionado e com acesso universalizado considerando um efluente devidamente tratado acarretará uma melhor qualidade dos corpos hídricos receptores, assim como, a diminuição de organismos patogênicos causados pela falta de saneamento básico.

Cada região do país apresenta a composição e características do efluente diferenciadas devido a fatores como clima, hábitos dessa população, situação econômica e acesso ao sistema de esgotamento. (BARROS, 1995). As fontes mais comuns de esgoto incluem, de acordo com Metcalf e Eddy (2016):

- Esgotos domésticos: oriundos de residências e instalações comerciais. Também conhecido como esgoto sanitário;
- Esgotos industriais: esgotos no qual há predomínio de efluentes industriais.
- Infiltrações: a infiltração é a água que adentra na rede coletora por meio de meios diretos ou indiretos através de juntas danificadas, fraturas ou rupturas das tubulações.

Segundo Von Sperling (2005) os esgotos domésticos são constituídos de 99,9% de água e a fração restante é composta de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, assim como microrganismos, sendo esta fração de 0,01% a responsável pela necessidade de tratamento, conforme apresentado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Sólidos no esgoto

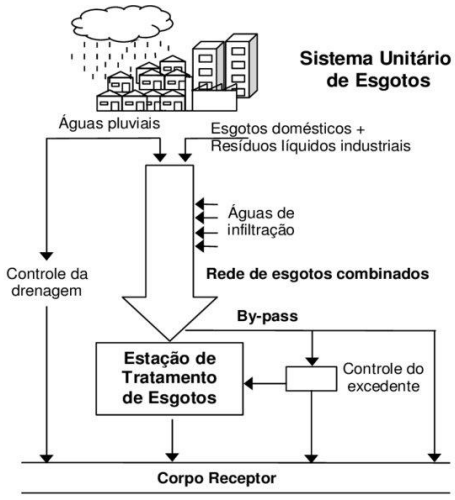


Fonte: Adaptado de Von Sperling (2014).

Existem 3 sistemas de esgotamento sanitário (MACHADO et al.; 2013; MENDES, 2020):

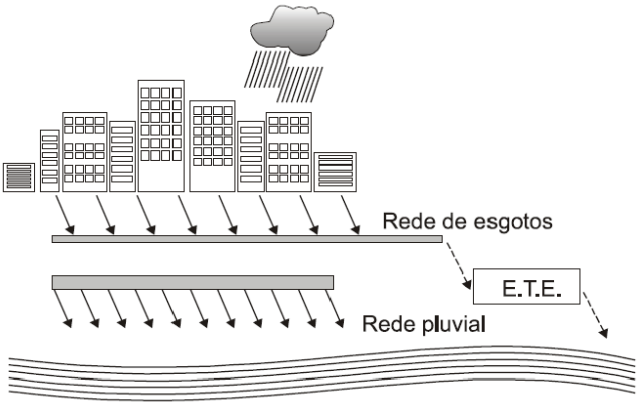
- Sistema Unitário: a rede coletora de esgoto é projetada e construída para coleta e condução de águas pluviais, esgoto doméstico e despejos industriais (Figura 3.5 a);
- Sistema Parcial: a rede coletora é destinada a recolher e transportar águas residuárias domésticas, industriais e parte das águas pluviais (telhados, pátios interiores, varandas). Este sistema tem dimensões menores que o primeiro;
- Sistema Absoluto: No sistema absoluto, adotado no Brasil desde 1911 e consequentemente na cidade de Ponta Grossa, a rede é projetada e construída especificamente para o transporte de esgoto sanitário. A água da chuva é coletada e transportada por outros sistemas completamente independentes (Figura 3.5).

Figura 3.5 - Sistema de esgotamento sanitário do tipo a) unitário e b) Sistema absoluto



a

Fonte: Bernardes (2004).



b

Fonte: Machado *et al*. (2013).

As vantagens do sistema absoluto são as tubulações de fácil acesso em dimensões menores, permitindo a utilização de pré-fabricação de baixo custo, facilitando a implantação gradativa e futura expansão do sistema, apresentando vazões praticamente constantes ao longo do ano e facilitando a retirada das águas pluviais. (MACHADO *et al*.; 2013; MENDES, 2020).

3.3 TRATAMENTO DE ESGOTO E UNIDADES OPERACIONAIS DE UMA ETE

A norma brasileira que trata sobre os projetos de estações de tratamento de esgoto sanitário, a NBR 12209, define ETE como o conjunto de unidades de tratamento, equipamentos, órgãos auxiliares, acessórios e sistemas de utilidades cuja finalidade é a redução das cargas poluidoras do esgoto sanitário e condicionamento da matéria residual resultante do tratamento. (ABNT NBR 12209).

Segundo Von Sperling (2014), o tratamento do esgoto consiste na remoção dos poluentes, de maneira a adequá-lo ao padrão de qualidade vigente em função de uma legislação específica. Os níveis de tratamentos são usualmente classificados como: preliminar, primário, secundário e, eventualmente, terciário.

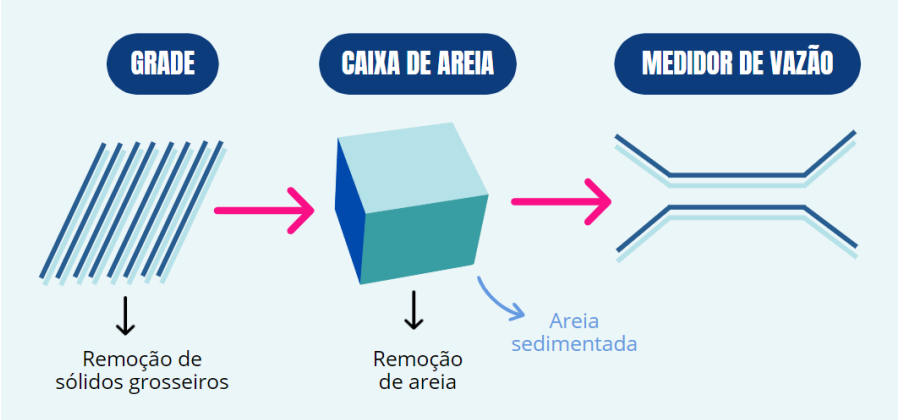
3.3.1 Tratamento Preliminar

Fazem parte desse tipo de tratamento, o sistema de gradeamento, desarenadores e calha Parshall. (VON SPERLING, 2014). O gradeamento possui a função de remoção de sólidos grosseiros, protegendo assim, os dispositivos de transporte dos esgotos (bombas e tubulações), as unidades de tratamento pelas quais o efluente ainda percorrerá e consequentemente, os corpos receptores. (VON SPERLING, 2014).

De acordo com o autor citado, o sistema de gradeamento consiste em grades metálicas, com determinado espaçamento entre si, podendo ser de 4 a 10 cm (grades grossas), de 2 a 4 cm (grades médias) e de 1 a 2 cm (grades finas), e tem como objetivo reter os materiais sólidos suspensos no efluente com maiores dimensões do que o seu espaçamento, a limpeza das grades pode ser realizada manualmente, no caso de unidade de limpeza manual ou mecanicamente, no caso de unidades mecanizadas, no caso de sólidos com dimensões ainda menores, pode-se ainda, utilizar peneiras no sistema de gradeamento.

Com a finalidade de evitar abrasão nos equipamentos, reduzir a possibilidade de obstrução em tubulações e orifícios e facilitar o transporte do líquido, os desarenadores são tanques de formato quadrado, retangular, entre outros, onde a remoção da areia é realizada por sedimentação, ou seja, os grãos de areia vão para o fundo, devido a maiores dimensões e densidade enquanto a matéria orgânica permanece em suspensão para ser tratada nos próximos níveis do processo. (VON SPERLING, 2014). Ademais, nesse sistema há calhas Parshall, as quais possuem atuação de acordo com medidores de vazão e possuem dimensões padronizadas. Nesse sentido, na Figura 3.6, apresenta-se a representação do tratamento preliminar.

Figura 3.6 - Tratamento Preliminar de uma ETE composto por grade, caixa de areia e medidior de vazão



Fonte: Adaptado de Guss (2011).

3.3.2 Tratamento Primário

O tratamento primário é composto por mecanismos físicos de remoção sólidos em suspensão sedimentáveis. O tratamento pode ser de sedimentação e flotação sendo uma parte significativa desses sólidos, matéria orgânica. (VON SPERLING, 2014). Assim, nos tanques de decantação, os quais podem ser retangulares ou circulares, os sólidos em suspensão de maior densidade e mais lentamente degradáveis, sedimentam primeiro, no fundo dos tanques, constituindo o lodo primário. (METCALF; EDDY, 2016).

Com a sedimentação da fração mais densa, ocorre uma redução da carga de DBO antes do efluente passar para a próxima etapa do tratamento. Essa massa de sólidos é raspada mecanicamente e de maneira contínua, pode ser retirada por uma tubulação única ou por bombas, no caso de tanques de maiores dimensões. (METCALF; EDDY, 2016; VON SPERLING, 2014).

3.3.3 Tratamento Secundário

O tratamento secundário baseia-se na utilização de processos biológicos para a aceleração da decomposição dos poluentes orgânicos degradáveis e tem como principal objetivo a remoção da matéria orgânica, seja ela dissolvida (DBO solúvel) ou em suspensão (DBO suspensa). No primeiro caso, ela não é removida no tratamento primário (processos físicos), já no segundo caso, trata-se de sólidos que

sedimentam mais lentamente, permanecendo assim na massa líquida mesmo após passar pelo tratamento primário. (METCALF; EDDY, 2016; VON SPERLING, 2014)

O processo do tratamento secundário pode visar também a remoção de nutrientes como fósforo (P) e nitrogênio (N), e é realizada por reações bioquímicas, através de microrganismos como fungos, protozoários e principalmente bactérias que se alimentam dessa matéria orgânica. A matéria orgânica é convertida em água e gás carbônico, além de proporcionar que esses microrganismos cresçam e se reproduzam. (VON SPERLING, 2014).

3.3.3.1 Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado - RALF

O Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado é uma tecnologia desenvolvida por técnicos da SANEPAR para o tratamento de águas residuárias previamente tratadas, entre os técnicos estão o engenheiro Celso Savelli Gomes e o engenheiro Décio Jürgensen e foi inspirada nos reatores anaeróbios holandeses (UASB – do inglês, *upflow anaerobic sludge blanket*).

O efluente tratado por processos preliminares e primários é lançado no fundo do reator formando um fluxo ascendente de esgoto através de um leito de lodo denso e de alta atividade biológica anaeróbia. Os microrganismos e o substrato quando entram em contato, fazem com que ocorra a estabilização biológica da matéria orgânica presente no efluente. (CRUZ, 2013).

Na margem do reator há vertedouros de formatos triangulares, onde é dividido, de maneira igual, o fluxo para o local que alimenta os tubos difusores, que por sua vez, conduz o esgoto para o fundo e o esgoto então, é misturado com o manto de lodo. (SCHLUSAZ, 2014). Ao entrar na base do reator, a velocidade do afluente diminui e faz com que os sólidos sedimentáveis se equilibrem e consigam se manter a uma certa altura, servindo assim, de suporte para que novas bactérias se desenvolvam. (CRUZ, 2013).

Na camada de lodo a matéria orgânica é degradada em condições favoráveis ambientais de acidez, temperatura e tempo de detenção hidráulica. No separador trifásico na parte interna superior do reator ocorre a sedimentação das partículas sólidas do lodo ou biomassa, direcionamento de gases para o gasômetro e do líquido clarificado para a próxima unidade de tratamento. A remoção do lodo

excedente é feita em intervalos de tempo em que é disposto em leitos de secagem e após é destinado para a agricultura ou aterros sanitários. (SCHLUSAZ, 2014).

3.3.4 Lagoas de Estabilização

Lagoas de estabilização são basicamente tanques escavados na terra, com profundidades variadas, de acordo com a finalidade e tem como objetivo estabilizar a carga de esgotos, simulando o processo que ocorreria no meio ambiente de maneira natural. Dessa maneira, é possível tratar o esgoto através da interação da biomassa (bactérias, algas, protozoários etc.) com processos naturais como fatores químicos, físicos, climáticos entre outros. (CRUZ, 2013).

Segundo Von Sperling (2017), as lagoas de estabilização são a forma mais simples para o tratamento de esgoto, mas para que as lagoas tenham alta eficiência são indicadas para regiões de clima quente, já que a temperatura e insolação são elevadas. Além desse, outros aspectos podem ser levados em consideração, como a simples operação, disponibilidade suficiente de área e a necessidades de poucos equipamentos. Em contrapartida, há também aspectos negativos, como é o caso do ambiente ser favorável ao desenvolvimento de insetos e a instabilidade do desempenho, já que depende diretamente do clima. (VON SPERLING, 2017).

As lagoas possuem algumas variantes conforme o modo de operação e requisitos quanto a área necessária para instalação, entre essas variantes está a lagoa aerada facultativa. Nela, o sistema predominante é aeróbio e a introdução de oxigênio no meio líquido é forçada através de equipamentos mecânicos e quanto à operação e manutenção, não é muito simples, se comparada às facultativas. (VON SPERLING, 2017).

Nesse processo, os sólidos tendem a sedimentar e formar uma camada de lodo no fundo que será decomposta de maneira anaeróbia. A DBO solúvel e a DBO representada pelos sólidos de menores dimensões permanecem na massa líquida e são decompostas de maneira aeróbia dependendo do tipo de lagoa. (CRUZ, 2013).

3.3.5 MBBR

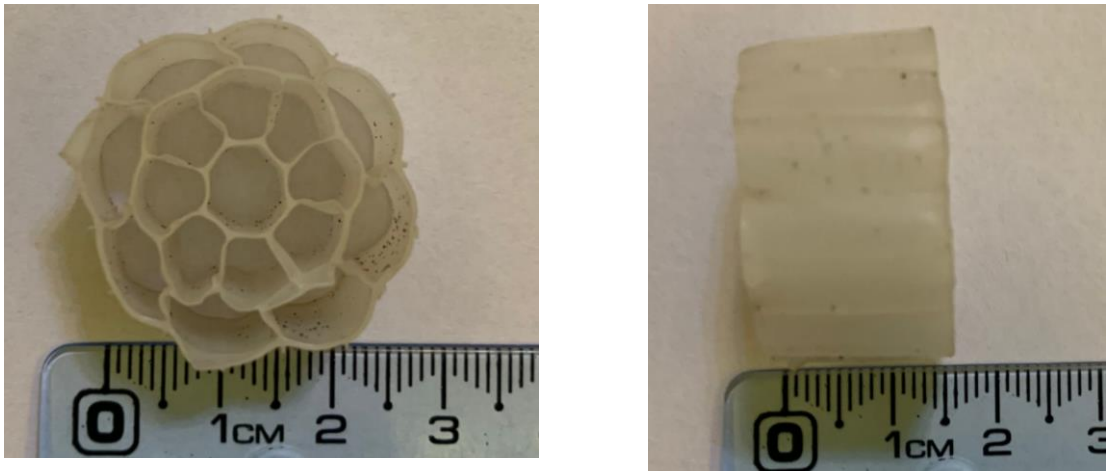
O desenvolvimento de estações de tratamento mais compactas e de alta capacidade de tratamento foi incentivado em 1988 na Noruega pelas autoridades

norueguesas responsáveis pelo controle de poluição. A intenção era ampliar a capacidade de processamento da maioria das ETE do país atingindo o melhoramento na remoção de nitrogênio e fósforo. Sendo assim, o MBBR foi desenvolvido pela empresa *Kaldnes Miljiteknologi A/S* em parceria com o Instituto de Pesquisa Norueguês. (OLIVEIRA, 2019; ZILLI, 2013).

O processo de biofilme de leito móvel é uma versão modificada da combinação de biofiltro e o processo de lodos ativados. O biofilme cresce em pequenos elementos suportes, os quais se movem livremente no meio reacional. Esses elementos suportes, no caso da Figura 3.7, consistem em pequenas peças de plástico de polietileno, com densidade ligeiramente menor (0,95-0,98 g/cm³) que da água. Assim, através da turbulência ocasionada pela aeração difusa de aeradores mecânicos, as biomidias encontram-se em movimento contínuo. (MADAN *et al.*, 2022). O excesso de biofilme é naturalmente desprendido do carreador, desocupando a superfície para outros micro-organismos, e os fragmentos liberados são facilmente separados da fase líquida na etapa seguinte, pois são mais compactos que os flocos de lodo convencionais e, portanto, assentam mais facilmente. (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Assim, trata-se de um reator biológico híbrido no qual os microrganismos permanecem suspensos no meio e aderidos ao meio suporte. A justificativa para adicionar mídia de suporte a reatores biológicos é a disponibilidade de área de superfície para crescimento de biomassa e aumento do tempo de residência celular. A formação de biomassa aderida além dos sólidos suspensos aumenta a conversão de compostos nitrogenados e a capacidade de decomposição de orgânicos carbonáceos em comparação com o que ocorre no processo de lodo ativado. (OLIVEIRA *et al.*, 2013).

Figura 3.7 - Biomídia utilizada no MBBR a) fotografia frontal e b) fotografia lateral

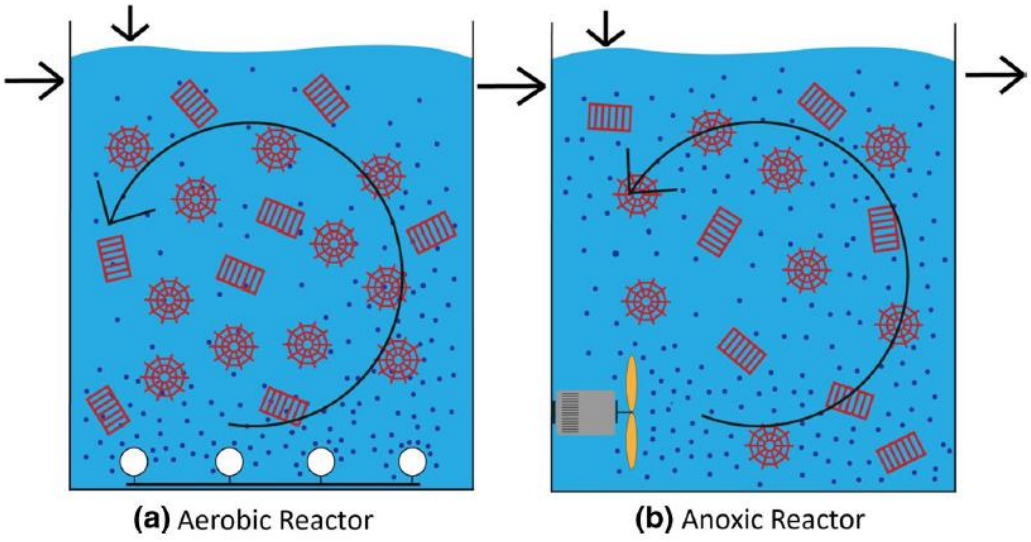


a b

Fonte: os autores, 2022.

No processo aeróbio, a agitação causada durante o processo de aeração auxilia no transporte do biofilme, enquanto no processo anóxico, ou seja, quando houver um tanque com a presença de nitrato e ausência de OD, apenas o misturador é responsável pelo transporte das biomidias, conforme ilustrado na Figura 3.8. (METCALF; EDDY, 2016).

Figura 3.8 - Princípio de funcionamento do MBBR em reator a) de sistema aeróbio e b) de sistema anóxico



Fonte: Madan *et al*. (2022).

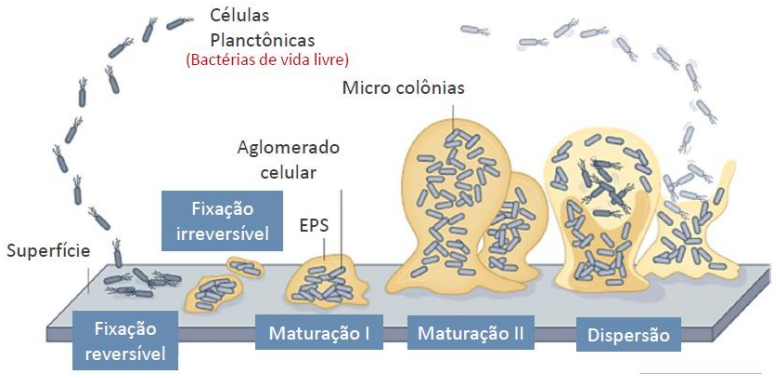
A quantidade de biomidia a ser colocada no reator depende do efluente. Porém, recomenda-se o enchimento máximo de 70% (em volume) para permitir a movimentação adequada da biomidia. (ODEGAARD, 2006). As principais vantagens do uso do MBBR segundo Oliveira (2013) e Almada (2012) para tratamento de esgotos são:

- Ocupa pouco espaço, quando comparado à sistemas convencionais;
- Redução de custos com obras civis, já que se trabalha com reatores de menor volume;
- Pode ser utilizado tanto para novas estações de tratamento, quanto para melhoramento do processo já existente;
- O processo apresenta resistência aos picos de cargas orgânicas e hidráulicas, às variações de pH e temperatura;
- Se comparado à biorreatores com biofilme em leito fixo, apresenta menor perda de carga;
- O escalonamento do sistema é mais facilitado.

Entretanto, o processo MBBR possui desvantagens como, elevado custo operacional principalmente quanto ao gasto energético proveniente da aeração e ao custo de compra das biomidias, já que são peças patenteadas. A realocação da biomidia é necessária quando há manutenção do sistema e as grades de aeração e hélices são propensas a desgaste excessivo devido a colisões com as biomidias. (RODGERS; ZHAN, 2003).

Biofilmes são agregados microbianos heterogêneos complexos que interagem em um sistema autoproduzido de sistemas poliméricos extracelulares. A estrutura extracelular contém polissacarídeos, ácidos nucléicos, proteínas, lipídios e alguns outros biopolímeros e substâncias húmicas. A formação do biofilme na superfície das biomidias ocorre através do processo de fixação e crescimento celular levando a um biofilme maduro, conforme exemplificado na Figura 3.9. (MADAN, 2022).

Figura 3.9 - Formação do biofilme



Fonte: adaptado de SAUER et al 2022

Por ser um processo aeróbio, há geração de biomassa que deve ser removida do meio líquido antes de seu destino final. Uma das alternativas para esta remoção é projetar após o MBBR, um sistema de coagulação e floculação seguido pela unidade de flotação.

3.3.6 Flotação

O sistema surge no final do século XIX para a recuperação de minérios. A partir da década de 90 que é instalado principalmente nos sistemas de tratamento de água no Brasil. Utiliza-se para separação de minérios, clarificação de efluentes de papel e celulose, no tratamento terciário ou pós-tratamento de esgoto e na remoção de turbidez, cor, sólidos suspensos totais, além da remoção de cianobactérias. (ETCHEPARE, 2016).

A flotação é um processo físico de separação de misturas heterogêneas, sendo utilizada para separar partículas suspensas ou materiais graxos ou oleosos de uma fase líquida e para concentrar biossólidos. A separação é obtida introduzindo-se bolhas finas de ar na fase líquida, provocando a ascensão de partículas para a superfície. Uma vez que na superfície podem ser coletadas e removidas por raspadores. (CHERNICHARO, 2001).

A principal vantagem no uso da flotação em relação à sedimentação é que as partículas que sedimentam lentamente podem ser removidas completamente em um curto período de tempo. Nesses sistemas, o nível de remoção é aprimorado quando há a utilização de aditivos químicos, em sua grande maioria cloreto férrico ou sulfato

de alumínio, que atuam para formar uma estrutura que possa facilmente agregar bolhas de ar. Conforme o Quadro 3.1, podem ser avaliadas as vantagens e desvantagens da flotação. (METCALF; EDDY, 2016).

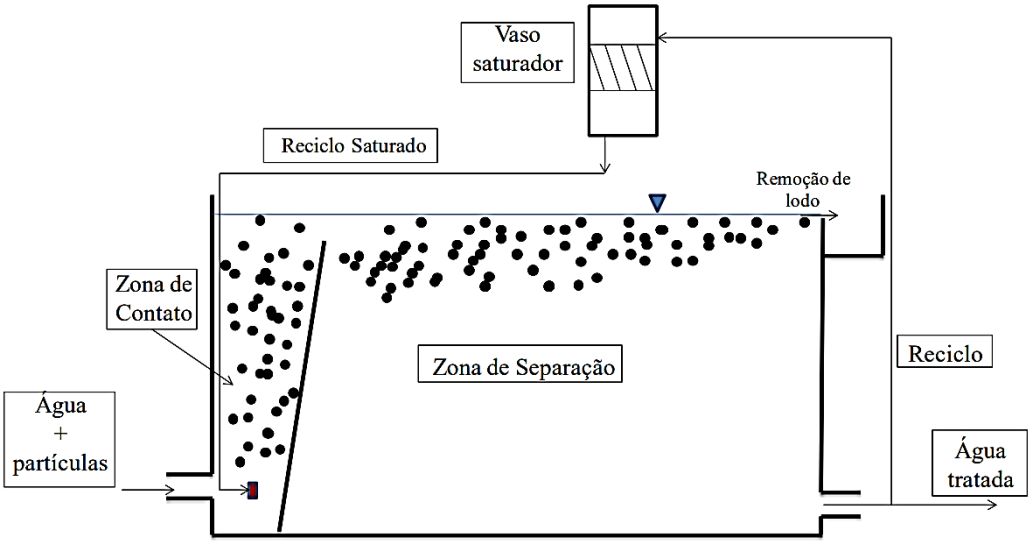
Quadro 3.1 - Quadro sobre vantagens e desvantagens do uso do flotador

VANTAGENS	**DESVANTAGENS**
Processo de alta taxa de aplicação superficial que resulta em unidades mais compactas;	Operação e manutenções mais complexas;
Melhor remoção de algas;	Requer um equipamento para geração das bolhas;
Maior remoção dos sólidos suspensos, principalmente os finos;	Maior consumo de energia;
Requer uma dosagem menor de reagentes;	Exige mão-de-obra mais qualificada para operação.
Reduz o volume de água descartado junto com o lodo.	

Fonte: Adaptado de CHERNICHARO (2001), METCALF; EDDY (2016).

Na flotação por ar dissolvido (ou FAD) o ar é introduzido no líquido a pressões de 3 a 4 atm, seguindo-se a despressurização na base do flotador, provocando a formação de bolhas minúsculas. A FAD também é muito usada para remoção de amônia do líquido. (METCALF; EDDY, 2016). Assim, no interior dessa câmara acontece a dissolução do ar na massa líquida pressurizada, em seguida, o efluente é exposto a condições atmosféricas, pois o flotador é aberto à atmosfera. Essa redução brusca na pressão provoca a solubilização do ar na forma de microbolhas que se aderem às partículas em suspensão e posteriormente sobem flutuando à superfície. (CAMPOS JUNIOR; SOUZA, 2016). Na Figura 3.10 pode ser analisado o exemplo de um FAD.

Figura 3.10 - Tanque de flotação com uso de vaso saturador



Fonte: CHERNICHARO (2001).

A unidade de tratamento por flotação deve vir em sequência das unidades operacionais de coagulação química e floculação. (METCALF; EDDY, 2016). A coagulação química consiste na adição de um reagente químico, tais como sulfato de alumínio, cloreto férrico e cloreto de alumínio, com o propósito de condicionar a matéria suspensa, coloidal e dissolvida para posterior processamento por floculação. A floculação é a agregação das partículas desestabilizadas, chamado de flocos. Os flocos agregados podem ser removidos pela sedimentação por gravidade ou filtração. (HOWE et al., 2016).

Na coagulação, o processo pode ser efetivo em segundos e é relacionado com a química do processo, enquanto na floculação e na separação dos flocos, etapas que demandam tempo superior, cerca de minutos, prevalecem os aspectos físicos. (CAMPOS JUNIOR; SOUZA, 2016). Destarte, o sucesso do processo pode ser influenciado pelo tipo e concentração do agente coagulante, intensidade de mistura, tempo para floculação e pH (HOWE et al., 2016) e pela qualidade das águas residuárias.

3.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS

Existem parâmetros que definem a qualidade desse esgoto se subdividindo em três categorias: físicas, químicas e biológicas. (VON SPERLING, 2014). Os principais parâmetros físicos são instituídos conforme a temperatura, cor, odor e

turbidez do efluente, ou seja, partículas sólidas ou suspensas em estado orgânico ou inorgânico que alteram a transparência (turbidez) e cor da água podendo resultar em precipitação em forma de lodo. (VON SPERLING, 2014).

As impurezas químicas consistem em substâncias orgânicas e inorgânicas solúveis. A parte orgânica é representada por proteínas, gorduras, carboidratos, fenóis e uma série de substâncias artificiais, como detergentes e pesticidas. Os minerais mais importantes são os nutrientes (nitrogênio e fósforo), enxofre, metais pesados e compostos tóxicos. (METCALF; EDDY, 2016)

As impurezas biológicas são representadas por organismos liberados com dejetos humanos: bactérias, vírus, fungos, vermes e protozoários. Alguns desses organismos geralmente habitam o intestino de uma pessoa e não prejudicam sua saúde; outros, que podem causar doenças, são chamados de patógenos. (MENDES, 2020).

Para se determinar a quantidade de matéria orgânica presente no esgoto sanitário e identificar o grau de poluição que esse efluente possui para se fazer o dimensionamento da estação de tratamento de esgoto (ETE) e medir a eficiência da mesma é necessário definir a demanda bioquímica de oxigênio (DBO). O principal efeito ecológico da poluição em um efluente é o decréscimo de oxigênio dissolvido (OD) causado pela respiração dos microrganismos presentes que se alimentam da matéria orgânica. (VON SPERLING, 2014).

O conceito de DBO é a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar através de processos bioquímicos a matéria orgânica carbonácea. Essa estabilização ocorre em cerca de 20 dias, determinando assim a DBO última (DBO_u), porém, para termos de laboratório convenciona-se proceder a análise no quinto dia a uma temperatura de 20ºC. (VON SPERLING, 2014).

Os esgotos domésticos possuem uma DBO da ordem de 300 mg/L, ou seja, para cada litro de esgoto se consome 300 mg de oxigênio em cinco dias. A demanda química de oxigênio (DQO), representa a quantidade de oxigênio requerida para se estabilizar quimicamente a matéria orgânica carbonácea utilizando de agentes oxidantes em condições ácidas. Normalmente a DQO varia entre 200 a 800 mg/L mantendo-se em torno de 400 mg/L. (VON SPERLING, 2014).

Normalmente, o resultado médio de DBO é dividido pelo resultado médio de DQO para encontrar um fator de conversão entre os dois parâmetros. Os valores dessa relação DQO/DBO aumentam devido a condição do esgoto bruto para o

esgoto tratado biologicamente, ou seja, quanto maior a eficiência do tratamento, maior o valor desse fator, sendo assim, nunca será superior a 1,0. Essa relação varia também de acordo com o tipo de tratamento que o efluente passa pelas unidades da estação de tratamento. (VON SPERLING, 2014). Assim, na caracterização das águas residuárias alguns parâmetros como sólidos, indicadores de matéria orgânica, nitrogênio, fósforo e indicadores de contaminação fecal (VON SPERLING, 2014) são essenciais para o monitoramento de uma ETE.

3.4.1 Sólidos

Além dos gases dissolvidos, todos os contaminantes da água colaboram com a carga de sólidos presente no efluente. Esses sólidos podem ser classificados conforme o seu tamanho e estado, as suas características químicas, bem como, de acordo com o processo de decantação. (VON SPERLING, 2014). A classificação por tamanho e estado se subdivide em sólidos em suspensão e sólidos dissolvidos, já a classificação por características químicas se divide em sólidos voláteis e sólidos fixos e a classificação por decantação, ou também chamada de sedimentalização, é separada por sólidos em suspensão sedimentáveis e não sedimentáveis. (METCALF; EDDY, 2016). No Quadro 3.2 estão descritas definições de cada subdivisão da série de sólidos.

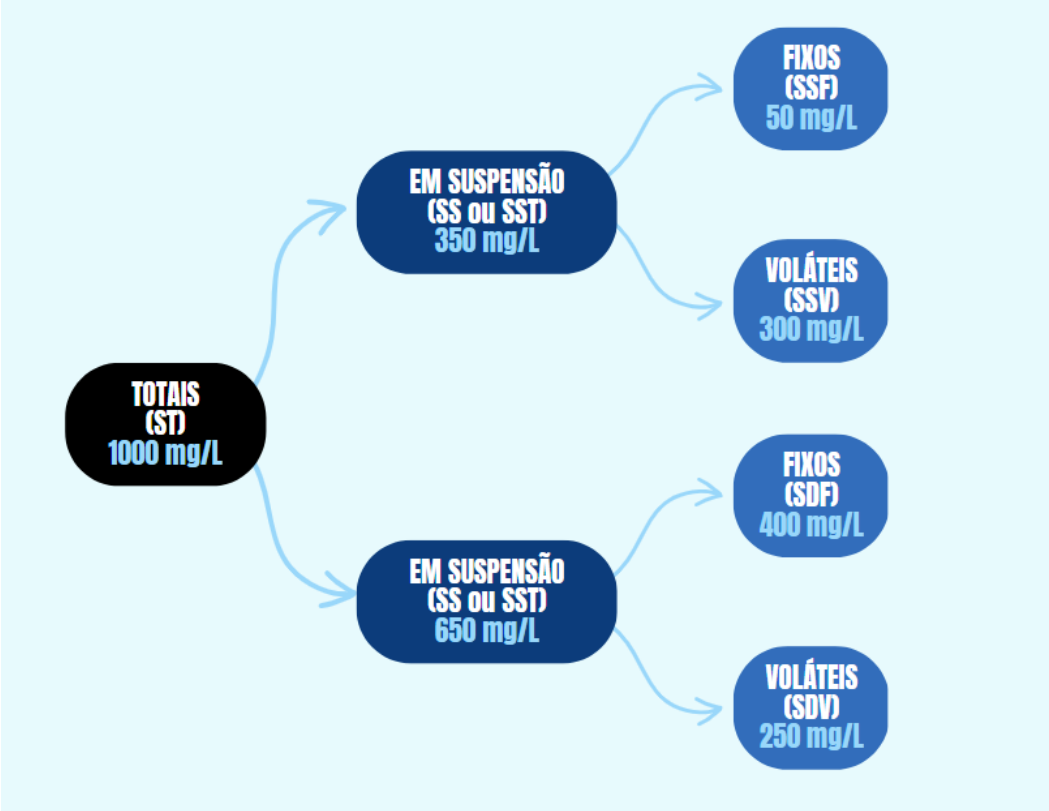
Quadro 3.2 – Descrição dos tipos de caracterização de sólidos totais

Parâmetro	**Descrição**
EM SUSPENSÃO	Fração de sólidos orgânicos e inorgânicos que fica retido em filtros específicos com dimensões padronizadas de 0,45 a 2,0 µm.
• *Fixos*	Componentes minerais, não incineráveis, inertes, dos sólidos em suspensão.
• *Voláteis*	Componentes orgânicos dos sólidos em suspensão.
DISSOLVIDOS	Fração de sólidos orgânicos e inorgânicos que não fica retida no filtro citado acima. É composto de sólidos coloidais e dissolvidos.
• *Fixos*	Componentes minerais dos sólidos dissolvidos.
• *Voláteis*	Componentes orgânicos dos sólidos dissolvidos.
SEDIMENTÁVEIS	É a fração de sólidos em suspensão que se deposita sob a ação da gravidade durante uma hora a partir de um litro de amostra mantido em repouso em um cone Imhoff.

Fonte: Von Sperling (2014); Metcalf e Eddy (2016).

Na Figura 3.11, Von Sperling (2014) ilustra a distribuição dos sólidos do esgoto bruto em termos de concentração.

Figura 3.11 - Distribuição dos sólidos do esgoto bruto em termos de concentração



Fonte: Adaptado de Von Sperling (2014).

3.4.2 Indicadores de Matéria Orgânica

A matéria orgânica presente nos esgotos é uma das características de primordial importância na avaliação da qualidade do esgoto, sendo ela a responsável pela necessidade de tratamento do efluente. As substâncias orgânicas são constituídas principalmente por compostos de proteínas, carboidratos, gorduras e óleos, ureia, fenóis, pesticidas, metais e outros. Em suma, usualmente não se caracteriza o efluente pelos seus compostos, visto que cada efluente é único. Por este ângulo, adotam-se métodos diretos ou indiretos para determinação da matéria orgânica. (METCALF; EDDY, 2016).

Os métodos indiretos são os mais usuais, sendo eles medidos por meio do consumo de oxigênio, sendo eles, DBO_5, DBO_u e DQO. O método direto é avaliado

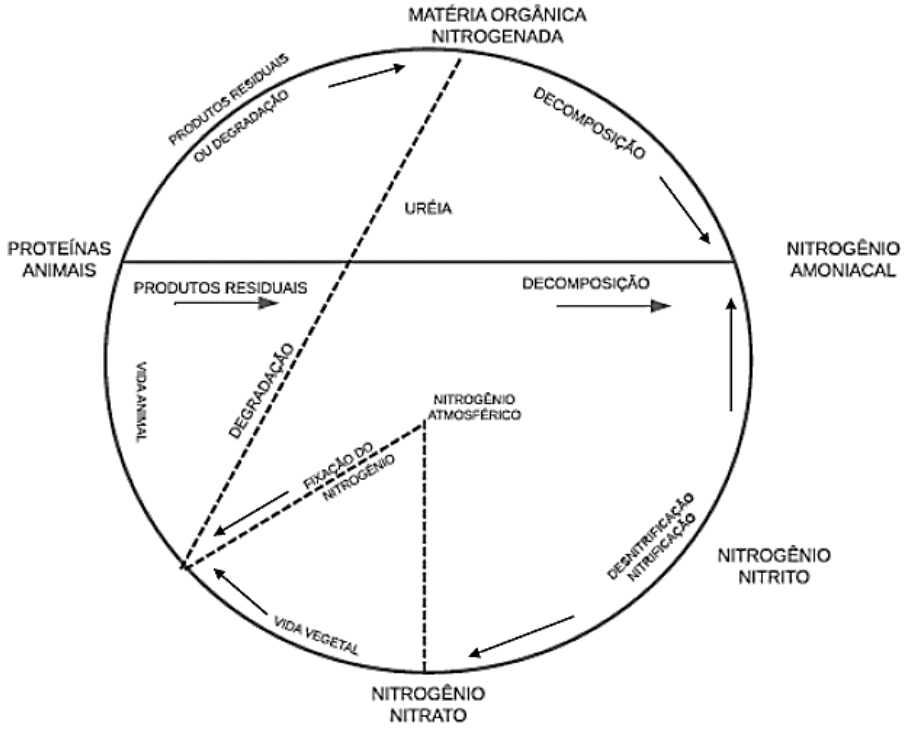
por meio da medição de carbono orgânico, sendo ele o carbono orgânico total (COT), mais usual. (VON SPERLING, 2014).

Quanto à DQO, o tempo de resposta de ensaio é mais rápido, se comparada à DBO, em torno de 2 horas, e, além disso, o ensaio de DQO contempla não somente toda a demanda de oxigênio satisfeita biologicamente (como a DBO), mas tudo que é propenso a demandas de oxigênio, especificamente os sais minerais oxidáveis. (JORDÃO; PESSOA, 1975).

3.4.3 Nitrogênio

Por ser um composto essencial na composição do esgoto, o nitrogênio é indispensável para o crescimento de algas e microrganismos responsáveis pelo tratamento e está presente na forma de nitrogênio orgânico (N), amônia (NH_3), nitrito (NO_2), nitrato (NO_3^-), ou gás nitrogênio (N_2). Por meio do nitrogênio, verifica-se o grau de estabilização da matéria orgânica pela forma em que é encontrado no efluente. Na imagem abaixo é possível demonstrar o ciclo do nitrogênio. (VON SPERLING, 2014; METCALF; EDDY, 2016; JORDÃO E PESSOA, 1975). Na Figura 3.12, verifica-se o ciclo do nitrogênio.

Figura 3.12 - Ciclo do nitrogênio



Fonte: Adaptado de Jordão e Pessoa (2017).

O nitrogênio para a realização da sua conversão implica no consumo de OD no corpo d'água receptor. Quando na forma de amônia livre é diretamente tóxico para peixes e em forma de nitrato está associado a doenças como metahemoglobinemia. (VON SPERLING, 2014). Assim, nos esgotos domésticos brutos há a predominância de nitrogênio orgânico e amônia, sendo o nitrogênio orgânico correspondente ao grupo amina, ou seja, por grande parte das cadeias de proteínas, e a amônia na ureia. A soma desses dois compostos resulta no Nitrogênio Kjedahl Total – NKT. (VON SPERLING, 2014).

3.4.4 Fósforo

O fósforo é um nutriente essencial para o crescimento de algas e microrganismos, diferentemente do nitrogênio, não possui uma forma gasosa para ser transferido para a atmosfera. Esse composto é encontrado na forma de fosfato e se apresenta de duas formas no esgoto:

- Inorgânico: originado de detergentes e outros produtos químicos de uso doméstico;

- Orgânico: de origem fisiológica.

Os esgotos municipais contêm valores típicos de fósforo variando entre 3,7 e 11 mg/L. O fósforo inorgânico pode representar até 50% da concentração total nos efluentes domésticos. (METCALF; EDDY, 2016; VON SPERLING, 2014).

3.4.5 pH

Outro parâmetro essencial para o controle e operação das estações de tratamento de esgoto é o potencial hidrogeniônico. O pH define a acidez ou basicidade da solução e é definido como o logaritmo negativo da concentração de íons hidrogênio, conforme a Equação 1.

$$\mathrm{pH} = -\log_{10}[\mathrm{H}^+] \quad (1)$$

A concentração de íons hidrogênio está ligada à extensão com que as moléculas de água se dissociam. A variação aceita do pH para os esgotos é entre 6,5 e 8,5, sendo considerado pH ácido o quão mais próximo do valor de 1 e básico o valor de 14. (METCALF; EDDY, 2016).

3.4.6 Indicadores de Contaminação Fecal

Na análise do esgoto é de suma importância levar em consideração a existência de organismos patogênicos e contaminantes devido à possibilidade de transmissão de doenças. Os principais organismos que podem ser considerados sob ponto de vista de saúde pública são as bactérias, vírus, protozoários e helmintos. A origem desses agentes patogênicos está diretamente relacionada ao nível de saúde da população e, também, das condições de saneamento básico de cada região. (VON SPERLING, 2014).

A quantidade de patógenos encontrada no esgoto varia conforme as condições socioeconômicas da população, das condições sanitárias, da região geográfica, da presença de indústrias agroalimentares e do tipo de tratamento de esgoto e de lodo a que foi submetido. A detecção desses organismos em uma amostra d’água é extremamente difícil, visto que além de existir uma mutação diária

desses agentes no esgoto, eles estão presentes em baixas concentrações. (VON SPERLING, 2014).

Para análise desse indicador são utilizadas a investigação de bactérias do grupo coliforme, pois os mecanismos de remoção dos coliformes dos corpos d'água são os mesmos utilizados na remoção de bactérias patogênicas. As técnicas para a detecção de coliformes são rápidas e econômicas. Para os efluentes, a ideia desta identificação não é determinar a existência de organismos fecais pois isso já é esperado, mas sim, definir a eficiência com que há a remoção dos patógenos no tratamento. (VON SPERLING, 2014).

3.5 Lodo

Lodo é o termo utilizado para se referir aos subprodutos sólidos do tratamento de esgotos. De maneira geral, todos os processos biológicos de tratamento geram lodo, alguns em menor, outros em maior quantidade e o que vai definir esse aspecto será, principalmente a escolha do sistema de tratamento. (VON SPERLING, 2014). O lodo pode ser primário, no caso dos processos que recebem o esgoto bruto em decantadores primários e é composto por sólidos sedimentáveis. Em condições de altas temperaturas, e retenção por muito tempo, o lodo primário pode exalar um forte odor. (METCALF; EDDY, 2016; VON SPERLING, 2014).

No processo biológico de tratamento, parte da matéria orgânica é absorvida e convertida, passando a fazer parte da biomassa microbiana, denominada genericamente de lodo biológico ou secundário e possui composição de principalmente sólidos biológicos, essa biomassa deve ser removida, pois está em constante crescimento, caso contrário ela poderá sair com o efluente final, comprometendo sua qualidade. (VON SPERLING, 2014).

Tem-se ainda o lodo químico, em casos de etapa físico-química, onde procura-se melhorar o desempenho do decantador primário ou do efluente secundário. (VON SPERLING, 2014). Assim, o gerenciamento desse lodo deve ser realizado da maneira mais responsável possível, caso contrário, corre-se um alto risco de comprometer os benefícios sanitários e ambientais que se espera de um sistema. (VON SPERLING, 2014).

As principais etapas desse gerenciamento podem ser: adensamento, estabilização, condicionamento, desidratação, higienização e disposição final. (VON

SPERLING, 2014). O adensamento trata-se de um processo físico de concentração de sólidos, visando a redução da sua umidade, podendo ser realizado por gravidade, flotação, centrifuga, entre outros. (VON SPERLING, 2014). Ademais, a estabilização pode ser realizada por digestão anaeróbia, aeróbia, estabilização química etc. Ela tem como objetivo reduzir os maus odores no processamento, removendo a matéria orgânica biodegradável, promovendo a redução de sólidos voláteis. (VON SPERLING, 2014).

Já no condicionamento acontece a preparação para a desidratação, adicionando produtos químicos como coagulantes para aumentar o desaguamento. O desaguamento pode ser realizado através de leitos de secagem, lagoas de lodo, centrifuga, entre outros. Essa fase tem como objetivo reduzir ainda mais o volume, fazendo com que o lodo tenha um comportamento mecânico próximo ao dos sólidos. (VON SPERLING, 2014).

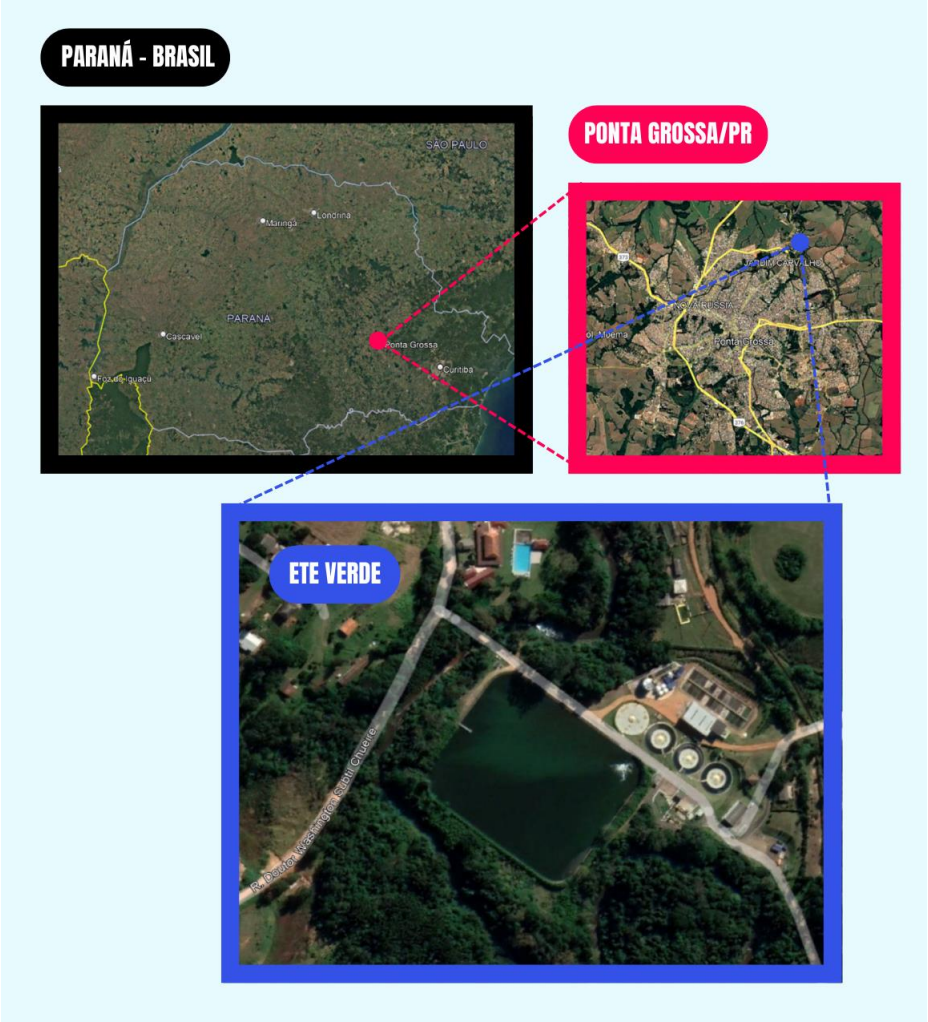
Havendo destinação para reciclagem agrícola, faz-se necessária a higienização, pois os processos de digestão aeróbia e anaeróbia não reduzem o nível de patógenos a patamares aceitáveis. A higienização pode ser realizada através da adição de cal, compostagem etc. (VON SPERLING, 2014). Por fim, quanto à disposição final, pode ser para uso agrícola, aterro sanitário, recuperação de áreas degradadas, uso não agrícola (fabricação de materiais de construção). (METCALF; EDDY, 2016; VON SPERLING, 2014).

4 METODOLOGIA

4.1 DESCRIÇÃO DA ETE VERDE EM PONTA GROSSA, PARANÁ

Conforme o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2010), Ponta Grossa está localizada no segundo planalto paranaense, foi estimada em 311.611 habitantes, cobrindo uma superfície de 2.054,732 km², tendo como coordenadas geográficas médias 25º09’ latitude sul e 50º16’ longitude oeste. O clima da cidade é “subtropical mesotérmico úmido, com temperatura média na estação de inverno de 13ºC e temperatura média de 21ºC durante o verão” (CRUZ, 2013). Na Figura 4.1, apresenta-se a localização da ETE Verde, em Ponta Grossa/PR.

Figura 4.1 - Localização da ETE Verde no estado do Paraná e no município de Ponta Grossa



Fonte: Autoras (2022).

A ETE Verde está localizada na Rua Doutor Washington Subtil Chueire no Jardim Carvalho. A bacia hidrográfica do Rio Verde está em área situada aos fundos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e possui uma área total de 52.986,00 m².

A Figura 4.2 mostra a localização da ETE Verde em imagem de satélite pelo Google Earth (2022) com as estruturas observadas em planta, sendo:

1: Tratamento preliminar;

2: Quatro RALF funcionando em paralelo;

3: Lagoa facultativa com aeração;

4: MBBR e tratamento físico-químico;

5: Leitos de secagem;

6: Barracão de gerenciamento de lodo (UGL);

7: Escritório da ETE

Figura 4.2 - Estruturas observadas na ETE Verde pelo Google Earth, imagem vista em planta.

Fonte: Autoras (2022) Imagem 2D adaptada de Google Earth.

Considerada a maior estação da cidade, a ETE Verde foi diretamente impactada pela expansão da cidade, necessitando de um aprimoramento no processo de tratamento de esgoto. O aumento foi de aproximadamente 1.042,00 m² de área, necessários para a inclusão do sistema completo de MBBR, seguido de tratamento físico-químico. (SANEPAR, 2022). Atualmente a ETE possui vazão nominal de 280 L/s.

4.2 DETALHAMENTO DAS UNIDADES OPERACIONAIS DA ETE VERDE

As unidades operacionais existentes no sistema serão apresentadas na ordem sequencial do fluxo de escoamento do esgoto e se subdividem em:

- Tratamento Preliminar: as estruturas presentes na ETE podem ser observadas nas Figura 4.3 e Figura 4.4, Canal de entrada (indicado pela seta azul) com extravasador de vazão excedente ou dispositivo para picos de vazão (indicado pela seta amarela).
- Sistema de gradeamento de limpeza manual com rastelo seguido por gradeamento de limpeza mecanizada para remoção de sólidos grosseiros.
- Dois desarenadores do tipo ciclônicos em paralelo.
- Calha Parshall com medidor de nível ultrassônico precedida por mais uma grade.

Figura 4.3 - Fotografias do Tratamento preliminar da ETE Verde – canal principal, extravasor de vazão e grades.

Dispositivo de pico de vazão

Grade de limpeza manual

Grade de limpeza mecanizada

Fonte: Autoras (2022).

Após cada desarenador o esgoto segue por um canal até a calha Parshall. Para cada desarenador, há uma calha instalada. Assim, os dois canais dos desarenadores convergem para um canal único (seta azul da Figura 4.4) e são distribuídos em iguais vazões para os quatro reatores anaeróbios que operam em paralelo.

Figura 4.4 - Fotografias do Tratamento preliminar da ETE Verde – desarenadores e calha Parshall

Desarenadores do tipo ciclônicos

Calha Parshall precedida por uma grade

a) Tratamento Secundário: fotografias da Figura 4.5 tiradas na visita técnica realizada na ETE Verde mostram o tratamento biológico ou secundário que é composto sequencialmente por:

- Quatro reatores anaeróbios tipo RALF de tronco cônico padrão SANEPAR projetados para vazão média de 70 L/s por reator.
- Lagoa facultativa de polimento com instalação de um soprador submerso (indicado pela seta amarela na Figura 4.5) e aproximadamente 50 difusores de ar instalados na entrada do efluentes pós RALF na lagoa (seta azul da mesma Figura 4.5).

Figura 4.5 - Fotografias do Tratamento secundário da ETE Verde – Reatores anaeróbios tipo RALF seguidos por lagoa facultativa

RALF

Fonte: WAGNER (2015).

Lagoa facultativa de polimento com aeradores

Fonte: Autoras (2022).

b) Tratamento de lodo secundário do RALF: o descarte do lodo excedente dos reatores anaeróbios é destinado para desague em leitos de secagem ou em centrífuga instalada no barracão para armazenamento e caleação de lodo centrifugado. Ao todo são 24 leitos de secagem que operam intercaladamente. Assim, cada leito apresenta tempo de secagem diferente. A Figura 4.6 mostra os 24 leitos de secagem e uma foto interna do barracão de armazenamento do lodo centrifugado.

Figura 4.6 - Ilustração dos dois sistemas de desague de lodo da ETE Verde a) em leitos de secagem e b) por centrifugação seguido de caleação

a) Leitos de secagem
Fonte: Google Earth (2020)

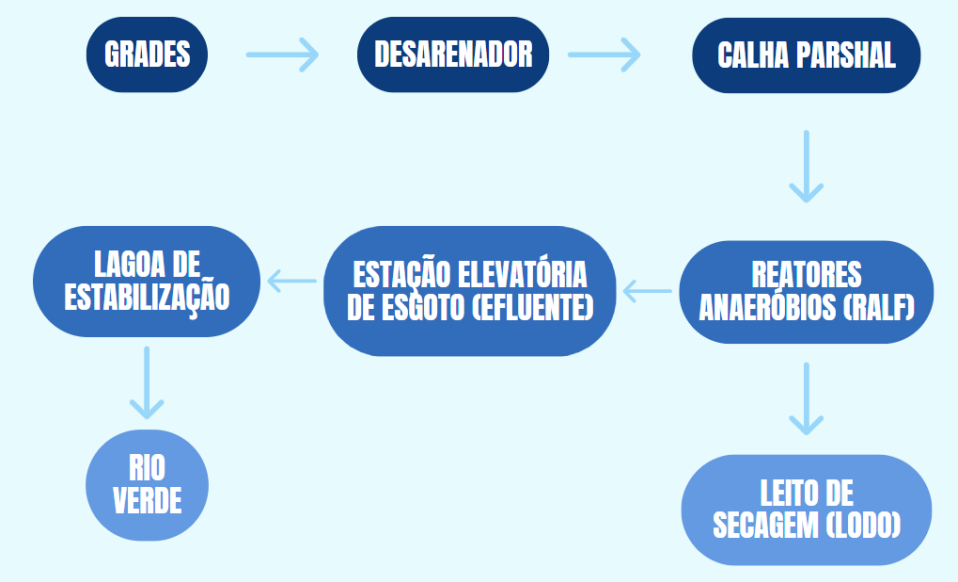
b) Barracão de centrifugação de lodo e caleação
Fonte: Autoras (2022).

4.3 OBJETO DE ESTUDO

No presente trabalho propôs-se realizar um estudo de caso, em que serão comparados parâmetros anteriores e posteriores à instalação do MBBR na estação de tratamento de esgoto já citada ETE Verde. Este tratamento complementar foi contratado pela companhia de saneamento e foi instalado por uma empresa terceirizada, pois a companhia de saneamento ainda não dispõe do arcabouço tecnológico e de parâmetros ou critérios de projeto para este tipo de tratamento biológico avançado.

O fluxograma apresentado na Figura 4.7 ilustra as unidades sequenciais de tratamento de esgoto usado na ETE Verde até o final de 2021.

Figura 4.7 - Fluxograma do sistema antigo de tratamento de esgoto na ETE Verde



Fonte: Autoras (2022).

O fluxograma apresentado na Figura 4.8 ilustra as unidades sequenciais de tratamento de esgoto usado na ETE Verde após a implantação das novas unidades de tratamento a partir de janeiro de 2021. Estas unidades foram instaladas de forma modular para complementar o tratamento dos reatores anaeróbios e enquadrar o efluente final em parâmetros mais restritivos de qualidade quanto à matéria orgânica.

Figura 4.8 - Fluxograma do novo sistema em implantação e objeto do estudo

Fonte: Autoras (2022)

Figura 4.9 – Foto do sistema MBBR seguido de tratamento físico-químico

Fonte: Autoras (2022).

4.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para atingir os objetivos do presente trabalho foram realizados os seguintes passos metodológicos: visitas técnicas, entrevistas com o pessoal técnico operacional da ETE, solicitação de dados para a companhia de tratamento, comparação de parâmetros fornecidos com dados de autores baseados em pesquisas bibliográficas para levantamento de elementos necessários para comprovação da eficiência do sistema.

Sobre a coleta dos dados para análise foram solicitados oficialmente os parâmetros previamente analisados de acordo com a revisão bibliográfica:

- Dados da ETE Verde: população atendida, vazão média, mínima e máxima da ETE, projeto do MBBR e do sistema físico-químico de tratamento depois da instalação do MBBR, custo total de implantação destas unidades, incluindo a elevatória;
- Histórico de 3 a 4 meses do monitoramento de variáveis físico-químicas (DBO, DQO, sólidos suspensos ou totais ou sedimentares, nitrogênio total orgânico, amoniacal, nitrato e nitrito e pH) que indicam a eficiência de tratamento em 4 pontos de coleta: entrada/afluente na ETE, saída do efluente RALF, saída do efluente do sistema da Gratt (MBBR seguido de sistema do flotador), saída do efluente da lagoa facultativa;
- Dados operacionais do MBBR: quantidade de oxigênio injetado no reator, vazão de ar ou oxigênio, concentração de OD (oxigênio dissolvido) que deve

ser mantido no tanque do MBBR, tempo de oxigenação ou funcionamento do reator por dia, custo para manter esta vazão de ar/oxigênio na concentração desejada, custo e gasto de energia elétrica do reator, descrição do material usado como recheio ou mídia, custo e quantidade necessária para o volume do tanque;

- Dados do sistema de coagulação-floculação-flotação e centrifugação do lodo: foram solicitados alguns parâmetros operacionais monitorados, tais como: estimativa da produção de lodo que pode ser a quantidade de caçambas e seu volume que vai para a UGL(Unidade de Gerenciamento de Lodo)/dia ou semana, quantidades e quais insumos são usados na floculação, tais como, PAC (cloreto de polialumínio), polímeros, coagulantes catiônicos e aniônicos, alguma substância que seja usada para acertar pH, custo dos produtos químicos, gasto de energia elétrica para a operação deste sistema de tratamento físico-químico que envolve deste a coagulação até a centrifugação do lodo.

Todos os dados operacionais e de monitoramento da ETE foram compilados em planilha do Microsoft Excel. Foi realizada uma estatística descritiva, que é a etapa inicial da análise de dados e tem por objetivo descrever os dados observados, e, plotado gráficos a fim de identificar o comportamento da ETE antes e depois da implantação do tratamento complementar. O desempenho do sistema foi avaliado quanto às eficiências de remoção de variáveis analisadas pela companhia de saneamento. A eficiência de remoção foi calculada segundo a Equação 1 segundo Bezerra e Matsumoto (2011):

$$Eficiência\ de\ remoção\ (\%) = \frac{S_0 - S}{S_0} . 100\% \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:

S: valor de DQO, DBO ou concentração de algum nutriente do efluente tratado;

S_0: valor de DQO, DBO ou concentração de algum nutriente do afluente bruto.

Para determinar a correlação entre as variáveis analisadas, utilizou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r), que varia de -1 a 1. O sinal sinaliza a direção positiva ou negativa da relação, e o valor sugere a força da relação entre as

variáveis. Na Tabela 4.1 observam-se os valores de correlação e suas interpretações.

Tabela 4.1 - Valores de referência para interpretação dos valores de correlação

Valores da Correlação	**Interpretação**
0,00	Nula
0,01 – 0,10	Muito fraca
0,11 – 0,30	Fraca
0,31 – 0,59	Moderada
0,60 – 0,80	Forte
0,81 – 0,99	Muito forte
1	Absoluta

Fonte: APPOLINÁRIO (2012)

Os dados fornecidos pela companhia de saneamento foram do período de janeiro/2021 a outubro/2022. O início de operação do sistema foi julho/2021, mas foram necessários 120 dias de pré-operação do MBBR e flotação para ajustes operacionais pela empresa contratada que instalou este tratamento complementar até que fossem atingidos os parâmetros contratados pela companhia e obtidos os resultados esperados. Também foi um período necessário para o treinamento de funcionários da companhia.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir será apresentada a compilação descritiva detalhada do tratamento complementar da ETE Verde como resultado desta investigação que foi realizada por meio da busca de documentos oficiais, entrevistas com o corpo técnico da companhia e por meio das visitas técnicas feitas para checagem de informações.

5.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO COMPLEMENTAR E DAS UNIDADES OPERACIONAIS MBBR E FLOTADOR

A estação modular para tratamento complementar do efluente dos reatores anaeróbios e desaguamento do lodo gerado no MBBR foi projetada para tratar uma vazão média de 12960 m³/dia ou 150 L/s. Esta configuração que será apresentada é chamada no meio comercial de tratamento modular porque as unidades operacionais são montadas em módulos a fim de atender o mercado de ETE modular permitindo o transporte facilitado e agilidade na instalação. Por meio do material fornecido pela Gratt, chamado de memorial de cálculo de projeto, é possível observar o detalhamento do projeto da ETE Verde.

A unidade operacional do MBBR está projetada para receber efluente com as seguintes características:

- Temperatura: 19 a 26°C;
- Sólidos Suspensos Totais: 20 mg/L;
- pH: 7,0;
- DBO média: 80 mg/L;
- Carga orgânica diária: 1036,8 kgDBO/d
- DQO média: 200 mg/L.

Os parâmetros esperados após o tratamento proposto que já podem ser destinados aos corpos hídricos ou para outra destinação final são os seguintes:

- Temperatura menor que 40°C;
- Sólidos Sedimentáveis Totais: 1,0 mL/L;
- pH: 5,0 – 9,0;
- DBO média < 30 mg/L;
- DQO média < 60 mg/L.

5.1.1 ELEVATÓRIA DE RECUPERAÇÃO DE NÍVEL

No projeto da ETE Verde foi necessário instalar uma unidade de Elevatória de Recuperação de Nível para atender a vazão de 150 L/s. O tempo de detenção do esgoto na elevatória era de 4,8 minutos, com altura de 3,9 m, largura de 4,0 m, comprimento de 4,0 m e volume de 62,4 m³.

Além disso, foi instalado um conjunto de bombas submersíveis para alimentação do Sistema de MBBR, sendo uma bomba para a operação de fato e outra como reserva. Cada bomba com vazão unitária de 540 m³/h (150 L/s) com possibilidade de escalonamento pelo inversor de frequência, para atendimento da vazão afluente.

5.1.2 SISTEMA DE TRATAMENTO DE ESGOTO COMPLEMENTAR

O sistema de tratamento é composto por um conjunto de estruturas importantes para o funcionamento do MBBR. Assim, além do tanque de MBBR propriamente dito que será detalhado na sequência, foram necessárias instalações auxiliares, tais como: misturador estático, floculador mecânico, flotador físico-químico por ar dissolvido, sistema de preparo e dosagem de coagulante para flotador, unidade automática de preparo de polímero, tanque de coleta de lodo flotado, bomba de descarte de lodo para desidratação e medidores online de efluente tratado.

Todos estes elementos foram dimensionados considerando a vazão nominal de 150 L/s (540 m³/h).

5.1.3 REATOR BIOLÓGICO AERÓBIO (MBBR)

O Reator Biológico Aeróbio construído de aço vitrificado circular de fundo plano e foi instalado com as dimensões totais de 10,7 m de diâmetro, 6,0 m de altura, sendo ocupado pelo esgoto dentro do tanque cilíndrico a altura de 5,5 m. Assim, 0,5 m foi mantida sem uso. Os volumes unitários foram de 494,5 m³ útil e de 539,5 m³ total.

Junto ao fundo do reator há um sistema composto por grades de difusores tubulares de aço inoxidável de bolha média/grossa. Este sistema tem a função de

manter toda a biomassa no interior do tanque em suspensão e com movimentação constante das mídias.

Os reatores são preenchidos com 50% de biomidias ou mídias de PEAD (polietileno de alta densidade) de área superficial específica de 500 m^2/m^3. Nas saídas dos tanques estão dispostas peneiras de aço inoxidável que impedem a passagem de mídia para o próximo tanque.

Para a vazão de 150 L/s é recomendado um volume de mídias plásticas de 224 m^3.

O sistema de aeração é composto por: duas unidades de sopradores de ar (a segunda é reserva), com uma vazão de ar de 40 m^3/min;

5.1.4 TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO APÓS O MBBR

Como a biomassa pode ficar suspensa no líquido do reator e como é um sistema aeróbio, há geração de lodo que deve ser removido antes do destino final. Porém, este lodo apresenta má sedimentabilidade e, por isso optou-se pelo uso do flotador para garantir a clarificação do efluente tratado pelo MBBR. Para isso, o sistema proposto pela empresa é tratamento físico-químico composto por processos de coagulação, floculação, flotação e centrifugação do lodo.

Em um misturador estático de aço inoxidável há a mistura adequada do coagulante com o esgoto. Em seguida, o esgoto passa para duas câmaras retangulares de floculação com mistura por agitadores mecânicos do tipo turbina de fluxo axial. Todas as estruturas do floculador são fabricados em aço inoxidável 316. As dimensões úteis totais do floculador são de 3,6 m x 9,6 m x 4,0 m (largura x comprimento x altura), volume útil de 127,87 m^3. Os gradientes recomendados para serem empregados na floculação variam entre 110 e 70 s^{-1} e o tempo de detenção hidráulica (TDH) médio de 14,2 minutos, pois deve encontrar-se entre 10 e 20 minutos de floculação, conforme a NBR 12209/2011.

Após a formação dos flocos, o esgoto vai para o flotador por ar dissolvido (FAD) assistido quimicamente e construído em chapa de aço inox, com caixa em formato retangular. As dimensões internas são de 16,25 m de comprimento, 3,8 m de largura e 1,80 m de profundidade, com fundo inclinado para remoção de sólidos sedimentados.

A área superficial para flotação do lodo de 61,75 m², taxa de aplicação de 8,74 m³/m².h e taxa de recirculação de 30%. Assim, a taxa de aplicação incluindo a recirculação é de 11,37 m³/m².h. A taxa de aplicação de sólidos resultante 3,67 kgSST/m².h. O lodo flotado é removido por um raspador de superfície com corrente de aço inoxidável e encaminhado para uma calha coletora de lodo incorporada, instalada no mesmo lado da entrada do efluente, com inclinação para o centro com tubo e flange de saída.

O sistema de distribuição do esgoto no fundo do flotador é realizada através de tubo central em aço inox com sistema de distribuição em vários pontos atuando em uma área de 3/4 do flotador. Os tubos dispersores têm diâmetro de 25 mm com 4 pontos de saída para cada dispersor.

O lodo adensado no flotador é encaminhado para um tanque coletor de lodo flotado de capacidade para 5.000 litros que fica em constante agitação a fim de evitar depósito de lodo no fundo. Em seguida, este lodo é direcionado para o tanque de equalização onde é adicionado um polímero para facilitar a desidratação do lodo na proporção de 0,008 kg de polímero (na concentração de 239,6 mg/L) para cada kg de sólidos totais. Isto resulta em um consumo de polímero para desidratação do lodo de 2156,4 litros por dia

E, depois deste tanque o lodo vai para uma centrífuga para desague. A rotação do cilindro de operação da centrífuga é de 4300 rpm. A massa sólida separada fica pressionada conta a parede interna do cilindro e uma rosca transportadora tipo helicoidal transporta esta massa até o final do cone onde o material desidratado é lançado para fora do equipamento para uma caçamba de 5 m^3 que pode ser removida por meio de caminhão brooks.

A estimativa de lodo gerado no processo instalado na ETE Verde é:

- Teor de sólidos: 3%
- Carga de sólidos suspensos totais removida: 539,1 kg/dia
- Vazão de lodo a ser descartado após o sistema de tratamento: 18,0 m³/d

Após, a caçamba de lodo recebe cal virgem para estabilização do material e é transportada para uma UGL que em Ponta Grossa, se localiza na ETE Ronda. Além das unidades já citadas aqui, foi observado que o novo sistema de tratamento conta com unidades automáticas de preparo de polímero, como o PAC, para desidratação,

medidor de sólidos, rosca transportadora helicoidal (caracol), bombas e unidades de caçamba sobressalientes e reservatório de água potável.

O sistema de aeração também conta com os seguintes: cinco unidades de sistema de preparo e dosagem de coagulante para flotador, com volume útil de 34,6 m³ por unidade, dimensões de 3500 mm x 3600mm (diâmetro x altura útil) e TDH de 30 dias de operação; uma unidade automática de preparo de polímero (UAP 1000), com capacidade máxima de 1000 L/h, faixa de concentração de 0,2% e matéria de fabricação o aço inoxidável AISI 316; uma unidade de tanque de coleta de lodo flotado, com volume de 5.000 litros e material aço inoxidável 316; duas unidades de bomba de descarte de lodo para desidratação (sendo a segunda a reserva), com vazão de 2,5 m³/h (variável por inversor de frequência) – operando a 0,8 m³/h e funcionamento de 24 horas por dia; medidores online de efluente tratado com uma unidade de sensor de pH, uma unidade de medidor de oxigênio dissolvido e uma unidade de medidor de temperatura.

5.1.5 Aspersores

Uma grande dificuldade encontrada na ETE Verde e no sistema MBBR é a formação de espuma, decorrente do excesso de produtos não biodegradáveis que entram no efluente e que não é removido nos processos anaeróbios. A forma encontrada pela Companhia para solução desse problema que era identificado dentro do tanque de MBBR foi a instalação de aspersores de água, sendo essa água o efluente final do tratamento físico-químico, responsável pela quebra dessa espuma.

O princípio de funcionamento é a pulverização de água, basicamente um chuveiro, conforme ilustrado na Figura 5.1. Para reduzir essa geração de espuma de forma química é utilizado antiespumante, porém é usado em pequena escala e não resolve o problema, sendo então, utilizados os aspersores.

Figura 5.1 - Aspersores de água

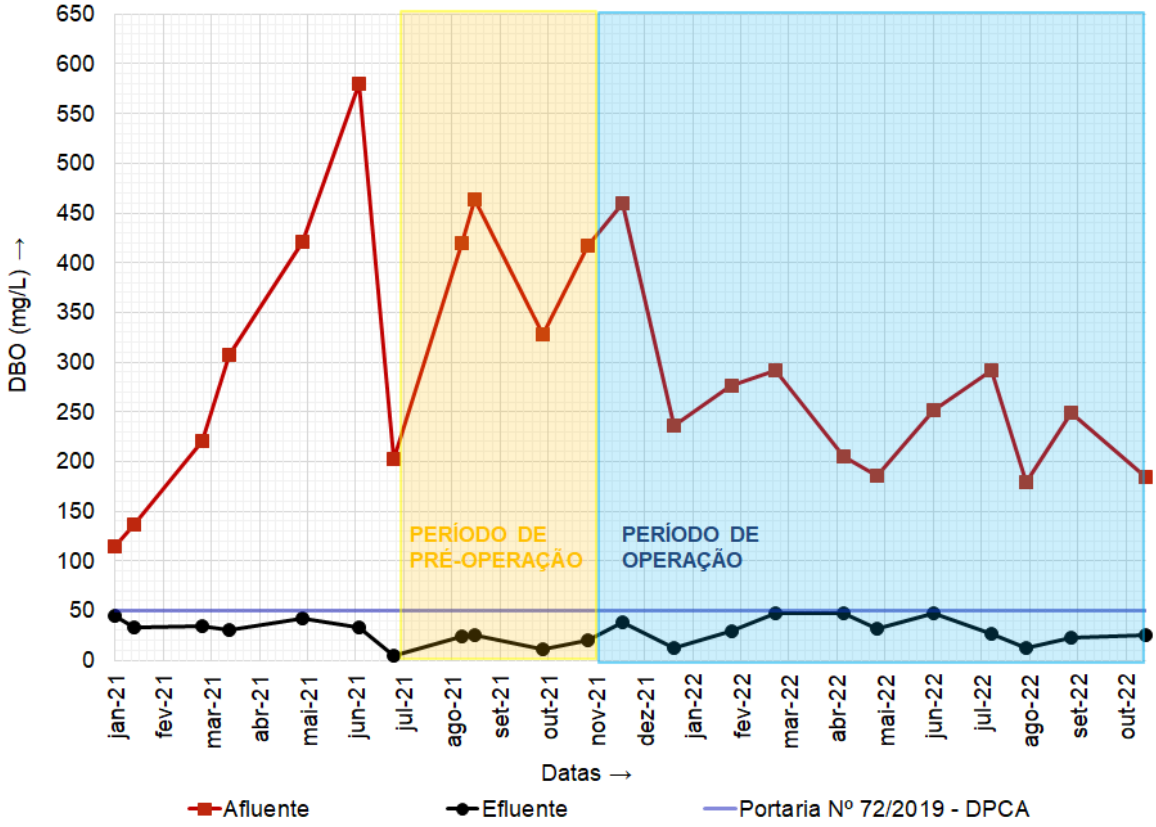
Fonte: Autoras (2022).

5.2 MONITORAMENTO DO DESEMPENHO DA ETE VERDE COM OS DOIS TIPOS DE PÓS-TRATAMENTO DO RALF: LAGOA DE ESTABILIZAÇÃO E O MBBR SEGUIDO POR FLOTAÇÃO

5.2.1 DBO

Para análise dos dados de DBO foram consideradas as medições mensais realizadas em laboratório da Companhia de Saneamento do Paraná. As medições foram realizadas no afluente e no efluente. Conforme o Gráfico 3.1 abaixo se observa que ocorreu uma diminuição considerável no valor, principalmente no período de pré-operação do reator.

Gráfico 5.1 - DBO do afluente e do efluente

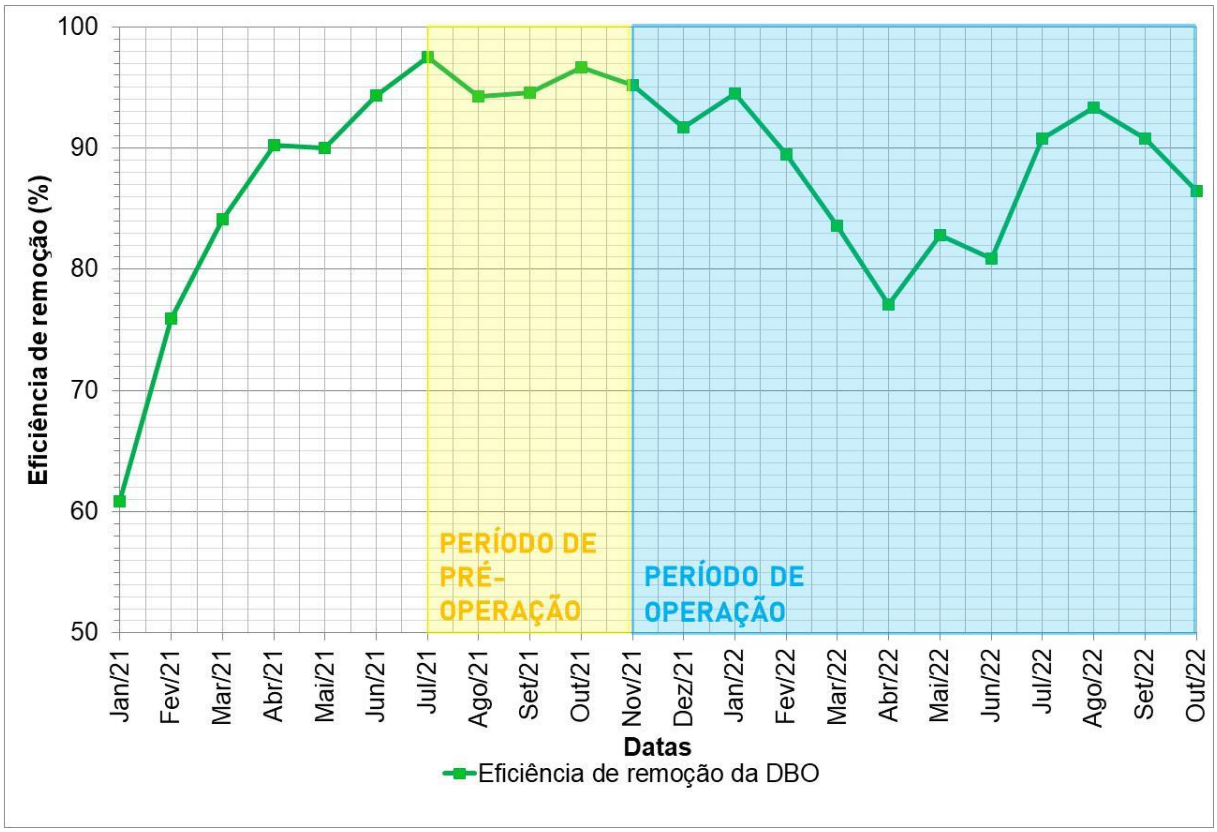


Fonte: Autoras (2022).

A Portaria nº 72/2019 usada como referência na estação de tratamento de esgoto em questão informa que o limite de DBO para lançamento no corpo hídrico é de 50 mg/L.

Quando se considera a eficiência total da ETE Verde de remoção de DBO é possível ver que a média de remoção do período de Janeiro de 2021 a Junho de 2021 é de 82,57%, do período de pré-operação que engloba os meses de Julho de 2021 a Outubro de 2021 é de 95,76% e em operação de 88,18%. O aumento da eficiência de remoção de DBO com a implantação de todo o sistema MBBR é de 6,8%.

Gráfico 5.2 - Eficiência da remoção da DBO em %



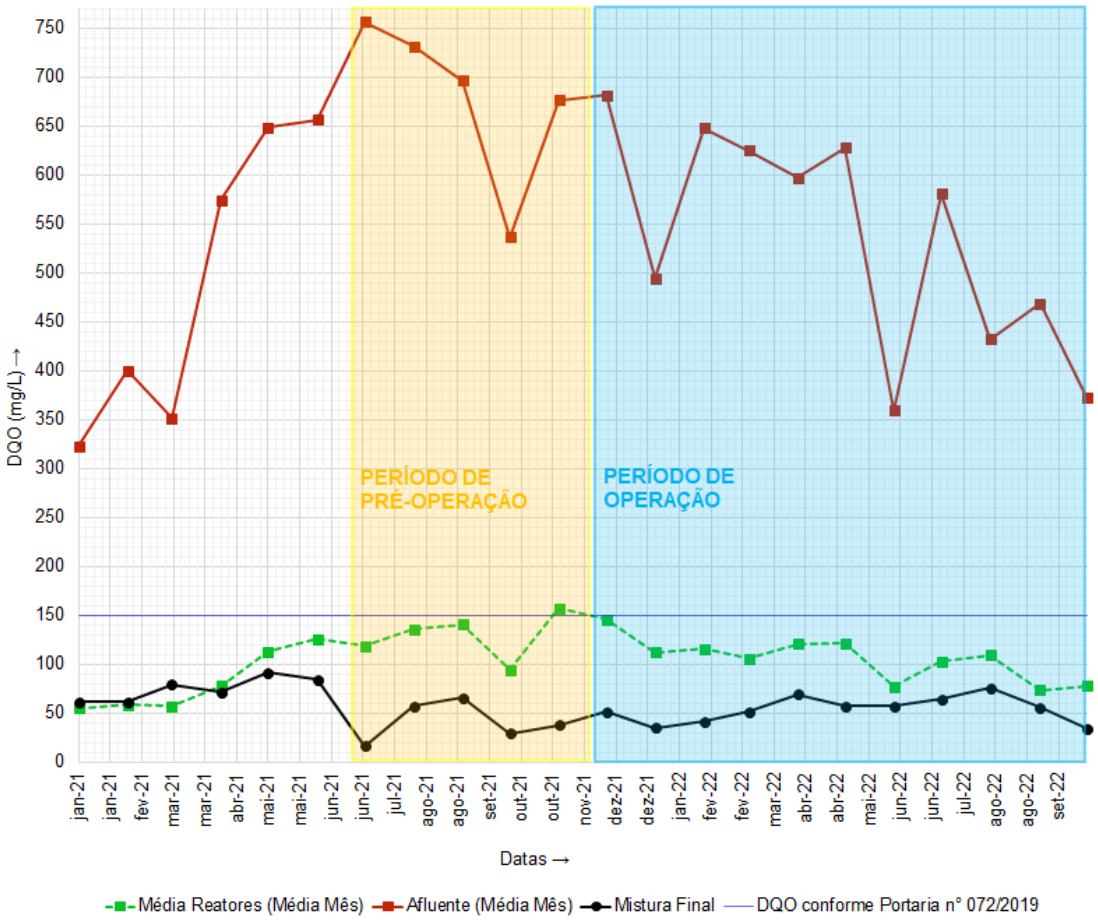
Fonte: Autoras (2022).

5.2.2 DQO

Como a DQO é uma variável monitorada com mais frequência pela ETE, há maior gama de dados coletados. Pelos resultados apresentados no Gráfico 5.1, pode-se observar que os valores de DQO foram inferiores após o período de operação do MBBR se comparado a quando somente havia a lagoa facultativa. Durante o período analisado houve uma variação considerável de valores de entrada de DQO, ou seja, dos valores de afluente, conforme ilustrado no Gráfico 5.2 abaixo, oscilando de 230 a 1014 mg/L. Esse valor decorre da sazonalidade, variância de vazão, entre outros quesitos.

Já a DQO de saída, isto é, do efluente final, varia de 40 a 147 mg/L no intervalo entre jan/21 a jun/21, 10 a 88 mg/L na pré-operação e de 20 a 115 mg/L quando em operação. Apenas por esses valores já é possível concluir que com a instalação foi interessante para a ETE Verde, pois a mesma obedece a Portaria nº 072/2019 que regulamenta que todo efluente que sai da estação deve conter valores menores que 150 mg/L de DQO.

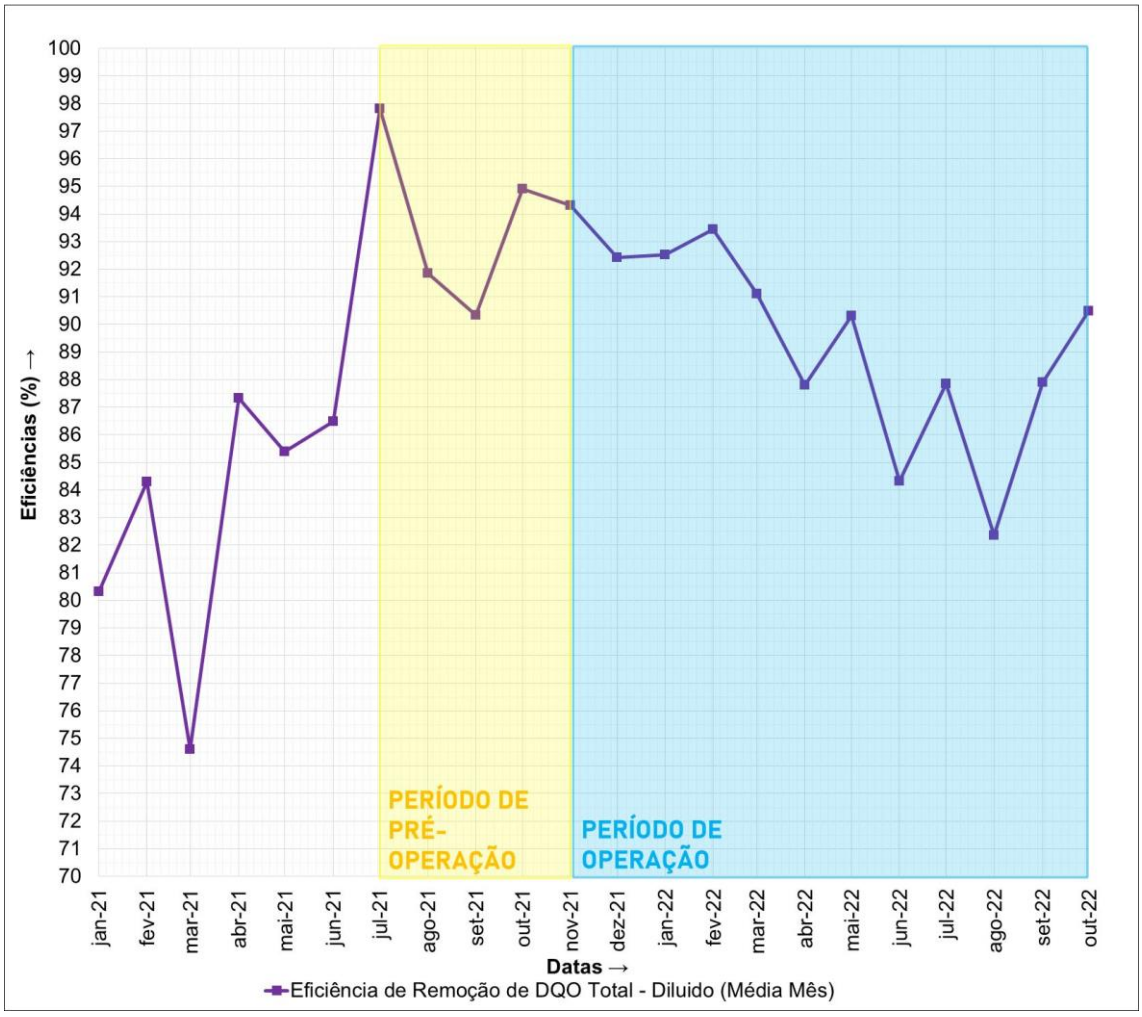
Gráfico 5.3 - DQO do Afluente, Média dos Reatores e Efluente final



Fonte: Autoras (2022).

Para uma melhor verificação foi levado em conta a eficiência, conforme o Gráfico 5.4. A eficiência média do MBBR no período de operação é de 89,56% sendo que no período em que se contava apenas com a lagoa para o pós-tratamento é de 83,07%. Portanto, houve um aumento de 7,7% no potencial de eficiência da estação. É possível observar que, provavelmente, houve uma melhora nos valores de DQO devido ao tempo de TDH da lagoa ter aumentado devido à menor vazão que entra nessa fase.

Gráfico 5.4 - Eficiência na remoção de DQO em %



Fonte: Autoras (2022).

O aumento da eficiência, principalmente, entre os meses de nov/21 a mar/22 mostram a que o acréscimo de todo o sistema de pós-tratamento é efetiva e cumpre a sua principal função, que é a maior remoção de matéria orgânica do efluente.

5.2.3 pH

O monitoramento dessa variável foi feito no afluente, nos RALF e no efluente pós a passagem pelo MBBR, na sua junção com o efluente da lagoa. Na Tabela 5.1 se observam os valores medidos. Como o objetivo principal do reator não é a remoção de nitrogênio e, sim, da carga orgânica, o pH se enquadra dentro dos valores esperado pela companhia.

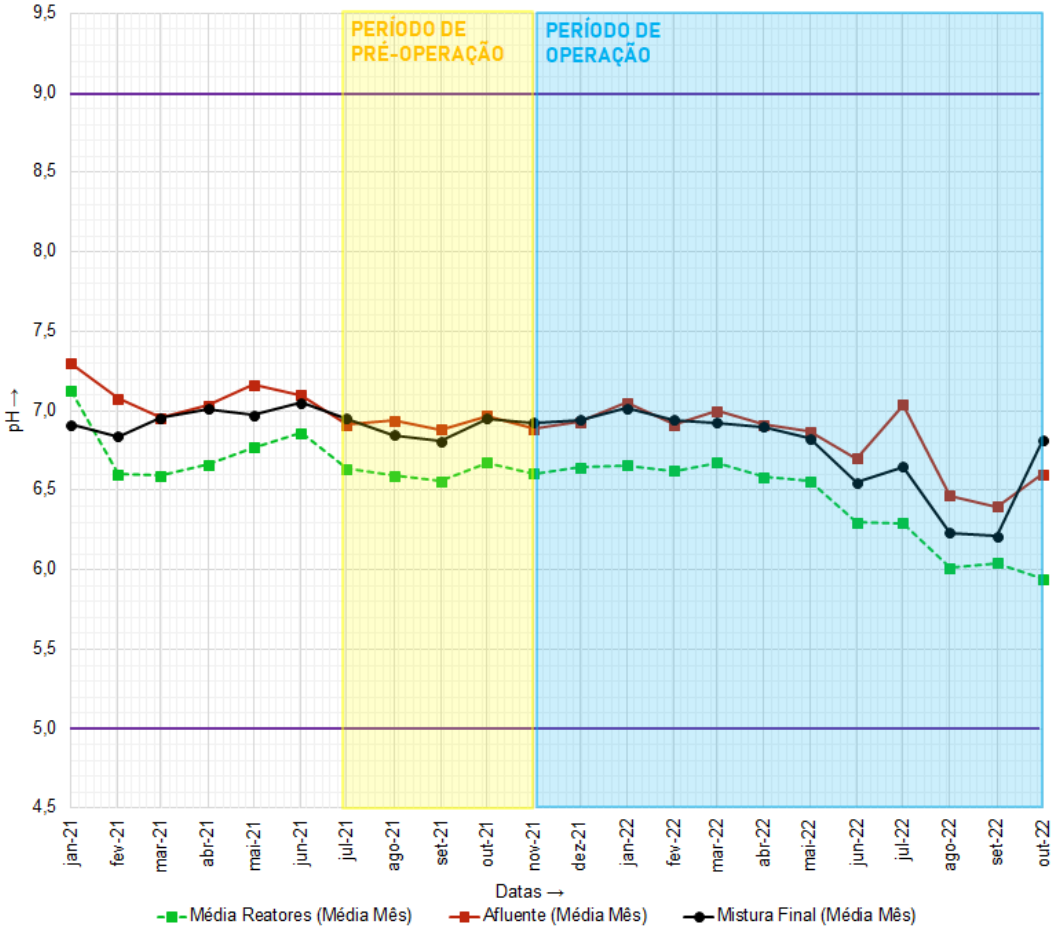
Tabela 5.1 - Variação do pH do Afluente, RALF e Efluente

Variação de pH			
	Apenas Lagoa	Pré-operação	Operação
Afluente	6,63 – 7,58	6,38 – 7,6	6 – 7,2
Média dos Reatores (RALFs)	6,39 – 7,17	6,3 – 6,9	5,9 – 6,75
Efluente	6,6 – 7,3	6,48 – 7,12	6,1 – 7,1

Fonte: Autoras (2022)

Vale salientar que há restrição de valores de pH para o lançamento de efluentes. Esses valores podem ser encontrados em legislações estaduais e nacionais pertinentes, como o CONAMA 430 (EXPERT, 2018), que exige classificação de 5 a 9 para águas residuais, sendo representados pela linha roxa no Gráfico 5.5.

Gráfico 5.5 - Evolução do pH



Fonte: Autoras (2022).

A redução do pH deve estar associada ao processo de nitrificação que ocorre involuntariamente. A alcalinidade é responsável por tamponar o meio líquido devido à formação de íons H+. Assim, se a alcalinidade do meio for baixa, a ação tampão não funcionará e o pH diminuirá. (JORDÃO; PESSÔA, 2014). O pH ótimo para bactérias nitrificantes é ligeiramente alcalino, variando de 7,2 a 9,0. (METCALF; EDDY, 2016).

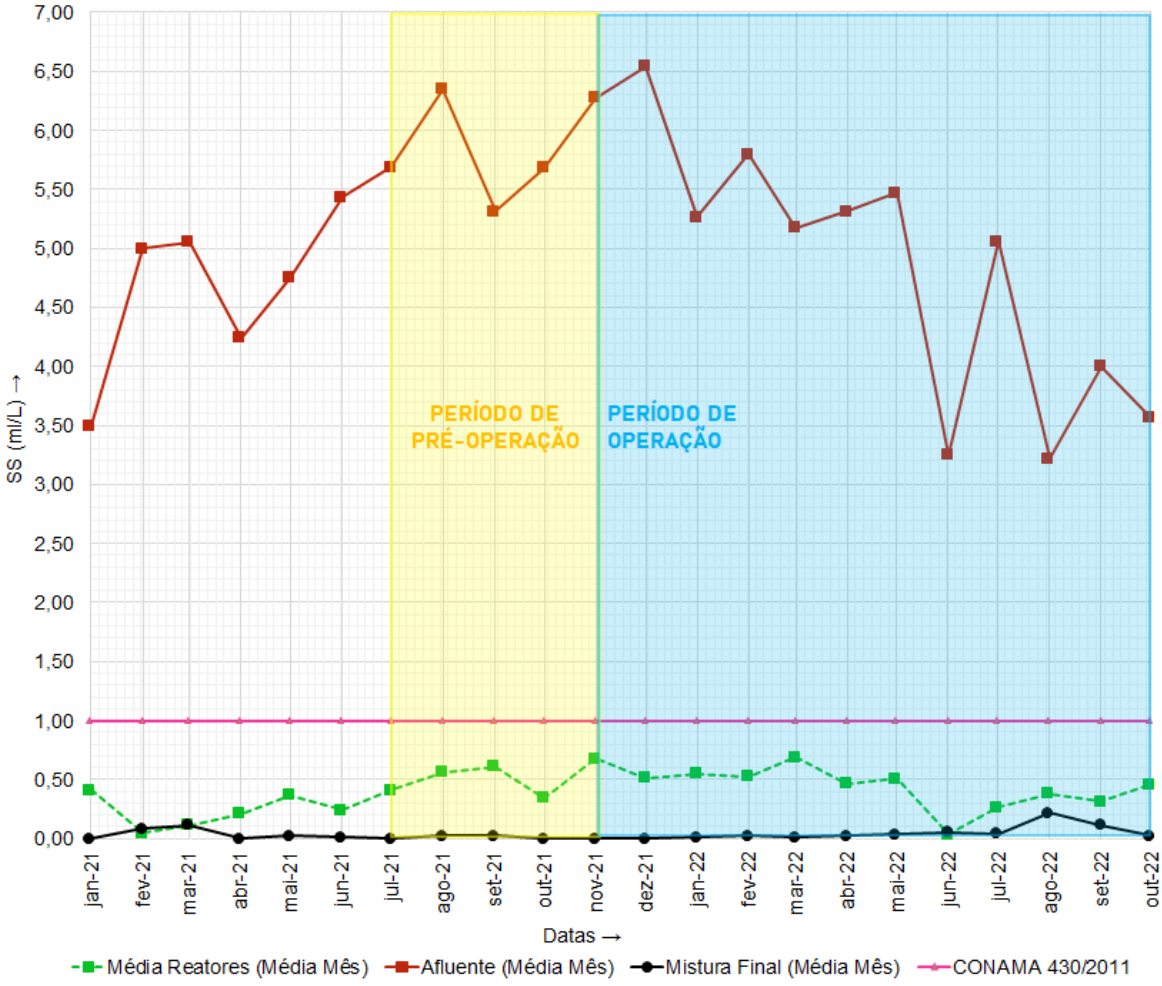
5.2.4 Sólidos Sedimentáveis

Os sólidos em sedimentação são indicadores de poluição e um critério importante para a legislação. A verificação desse parâmetro é fundamental para garantir que o efluente esteja livre de contaminação e, por ser um elemento de controle legal do tratamento de efluentes, a análise de sólidos sedimentáveis deve ser realizada de forma recorrente. As acumulações dos sólidos sedimentáveis formam o lodo. (PROMATECA AMBIENTAL, 2021).

A resolução CONAMA 430/2011, no artigo 16 cita que:
I - condições de lançamento de efluentes:
c) materiais sedimentáveis: até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Inmhoff. Para o lançamento em lagos e lagoas, cuja velocidade de circulação seja praticamente nula, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes;

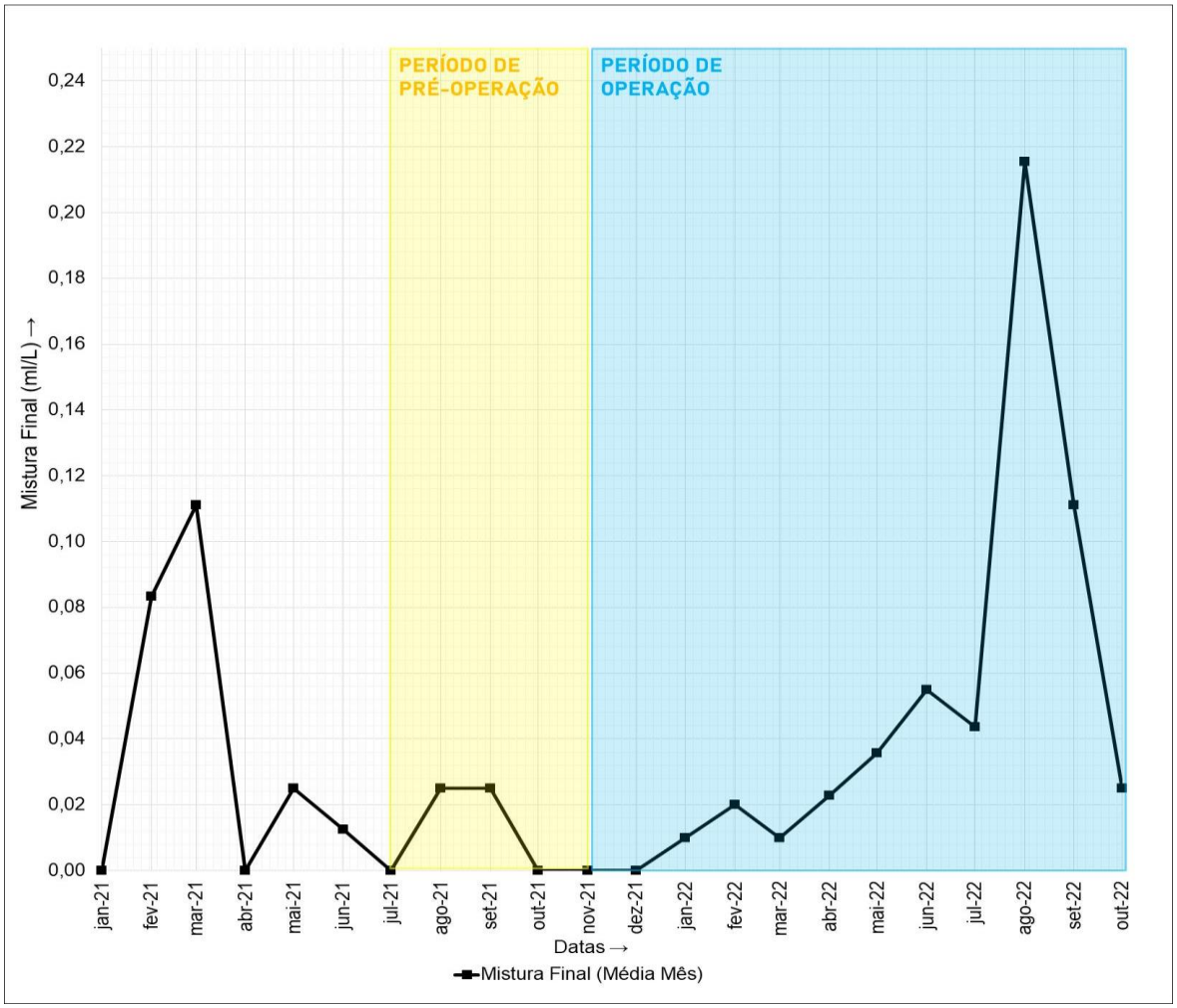
Nos Gráfico 5.6 e 5,7 de valor médio mensal de sólidos sedimentáveis é possível observar que é um parâmetro atingindo antes mesmo da instalação do reator MBBR. A eficiência média de remoção é de 98,8% desde a implantação, ou seja, no período compreendido de nov/21 a out/22, conforme exemplificado no gráfico 5.8.

Gráfico 5.6 - Evolução dos valores de Sólidos Sedimentáveis



Fonte: Autoras (2022).

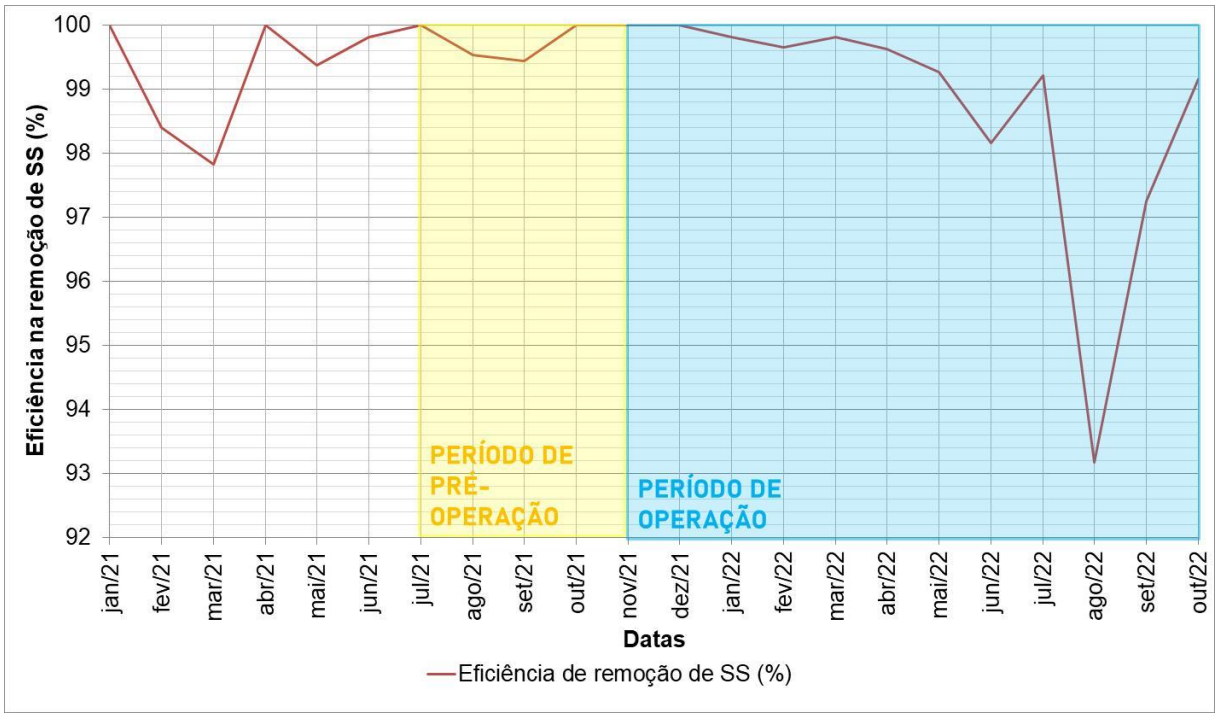
Gráfico 5.7 - Evoluções dos valores de Sólidos Sedimentáveis do Efluente Final



Fonte: Autoras (2022).

Os valores de eficiência exemplificados no Gráfico 5.8 mostram que não há valores abaixo de 93,17%.

Gráfico 5.8 - Eficiência da remoção de SS (%)

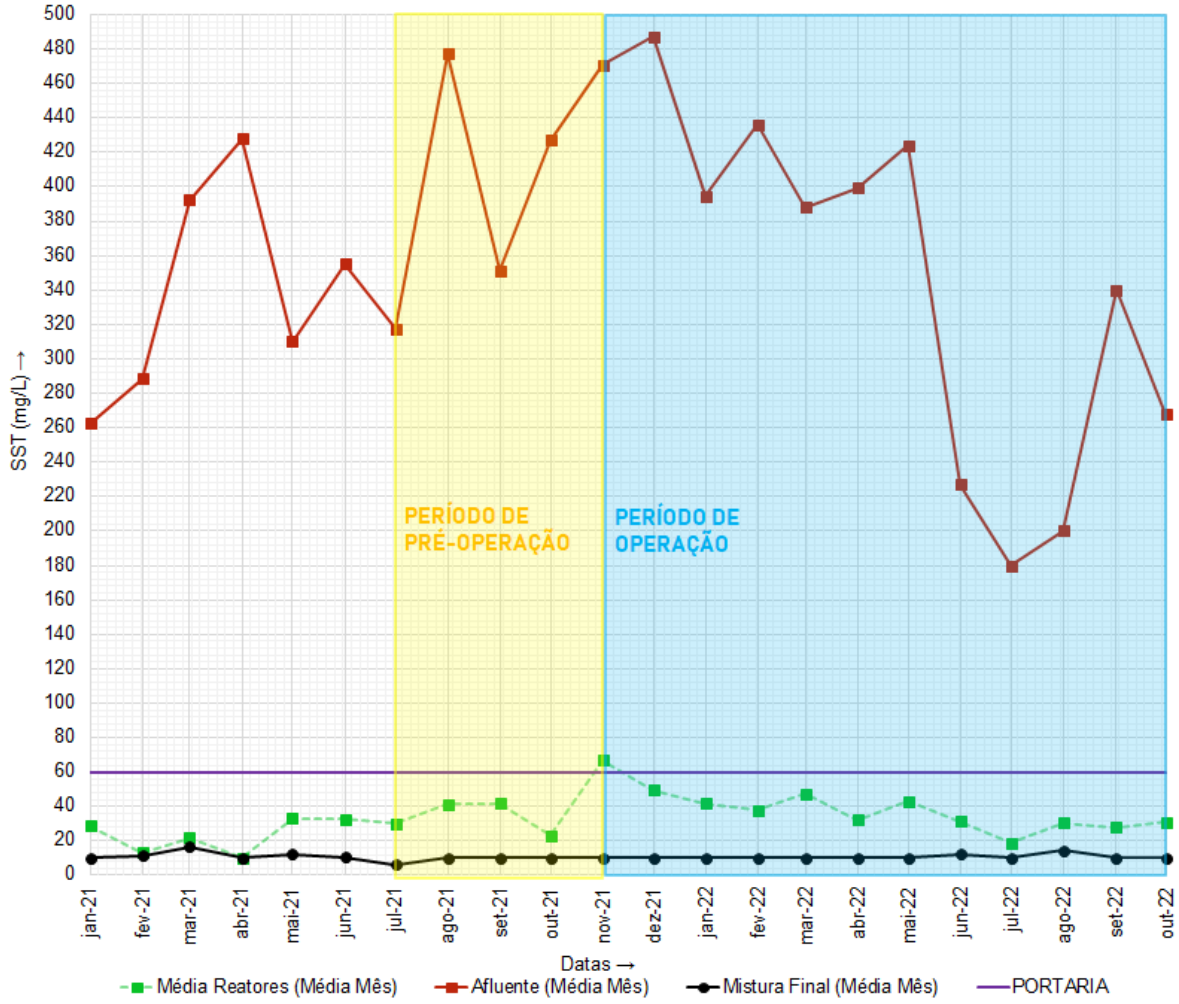


Fonte: Autoras (2022).

5.2.5 Sólidos Suspensos Totais

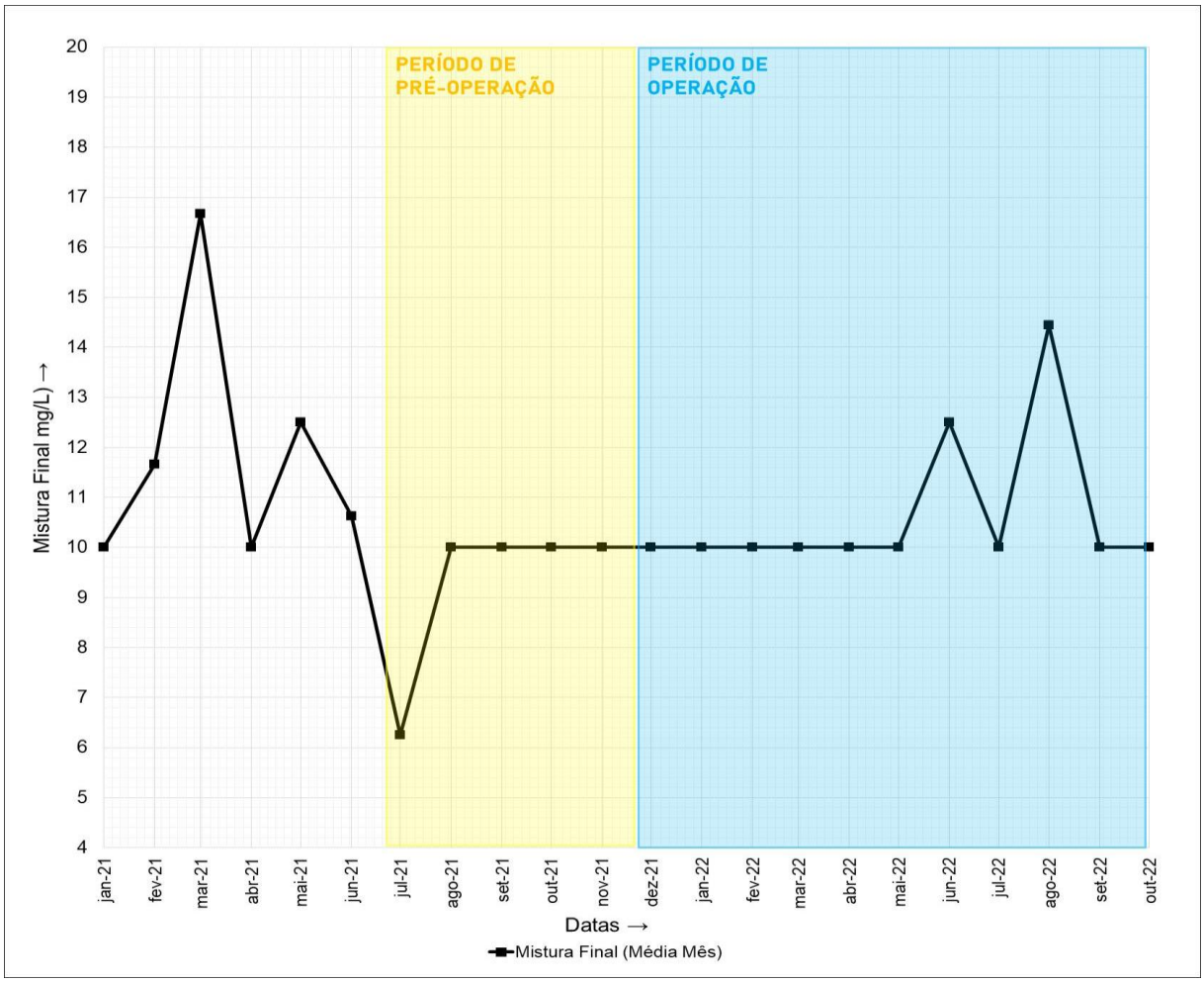
A análise dos sólidos suspensos totais é baseada na portaria nº 72/2019 que define que o padrão do efluente lançado no corpo hídrico não deve ultrapassar 60 mg/L em sua concentração máxima. Pode se observar por meio do Gráfico 5.9 que no período compreendido entre os meses de Jan/21 e Jun/21 há um aumento considerável, porém, ainda dentro das normas necessárias.

Gráfico 5.9 - Evolução dos sólidos suspensos totais (SST)



Fonte: Autoras (2022).

Gráfico 5.10 - Evolução dos valores de SST no Efluente Final

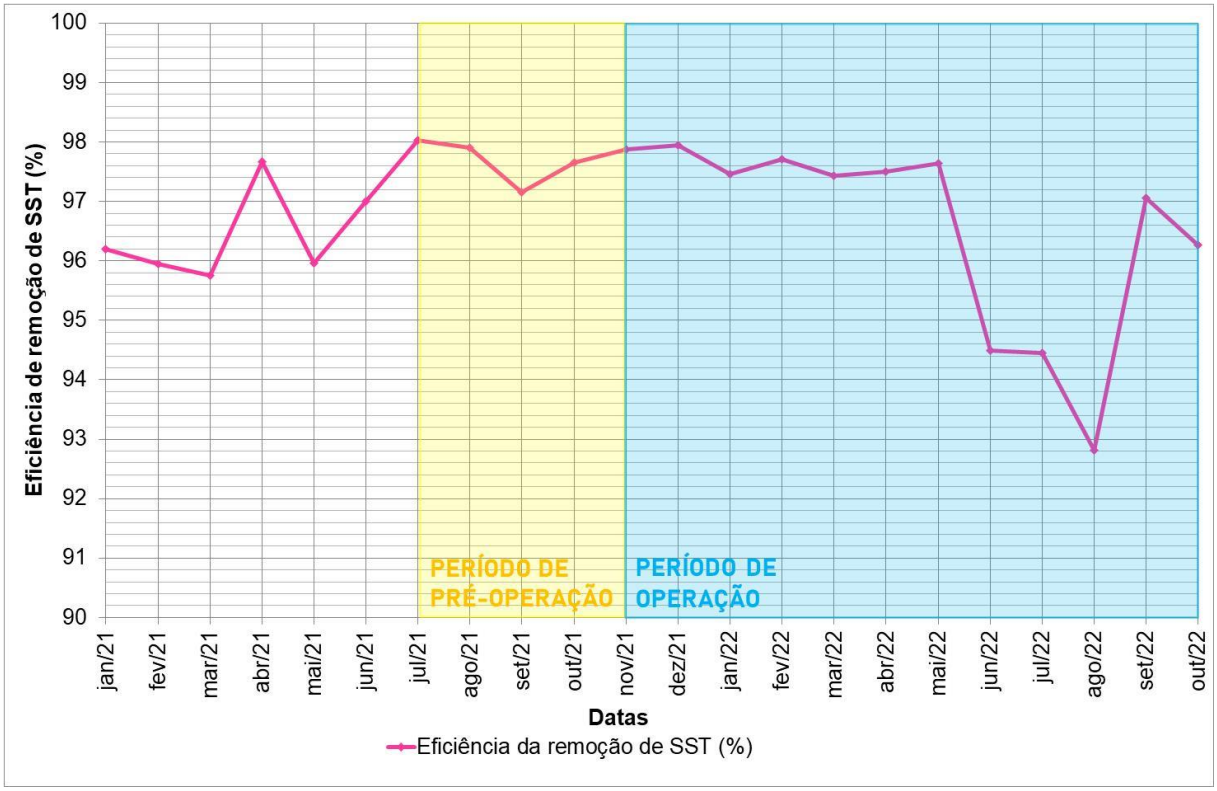


Fonte: Autoras (2022).

A partir da implantação do reator MBBR seguido de flotação acontece um período de constância de dados sucedendo ao aumento de alguns meses pontuais, sendo eles Jun/22 e Agosto/22, como é possível observar no gráfico 5.10.

O percentual de eficiência de remoção de SST na ETE Verde, exemplificado no gráfico 5.11, é de 96,6% depois da implantação do MBBR, já no período de Jan/21 a Jun/21, onde existia apenas a lagoa, o percentual era de 96,4%.

Gráfico 5.11 - Eficiência na remoção de SST (%)



Fonte: Autoras (2022).

5.2.6 Temperatura de efluente

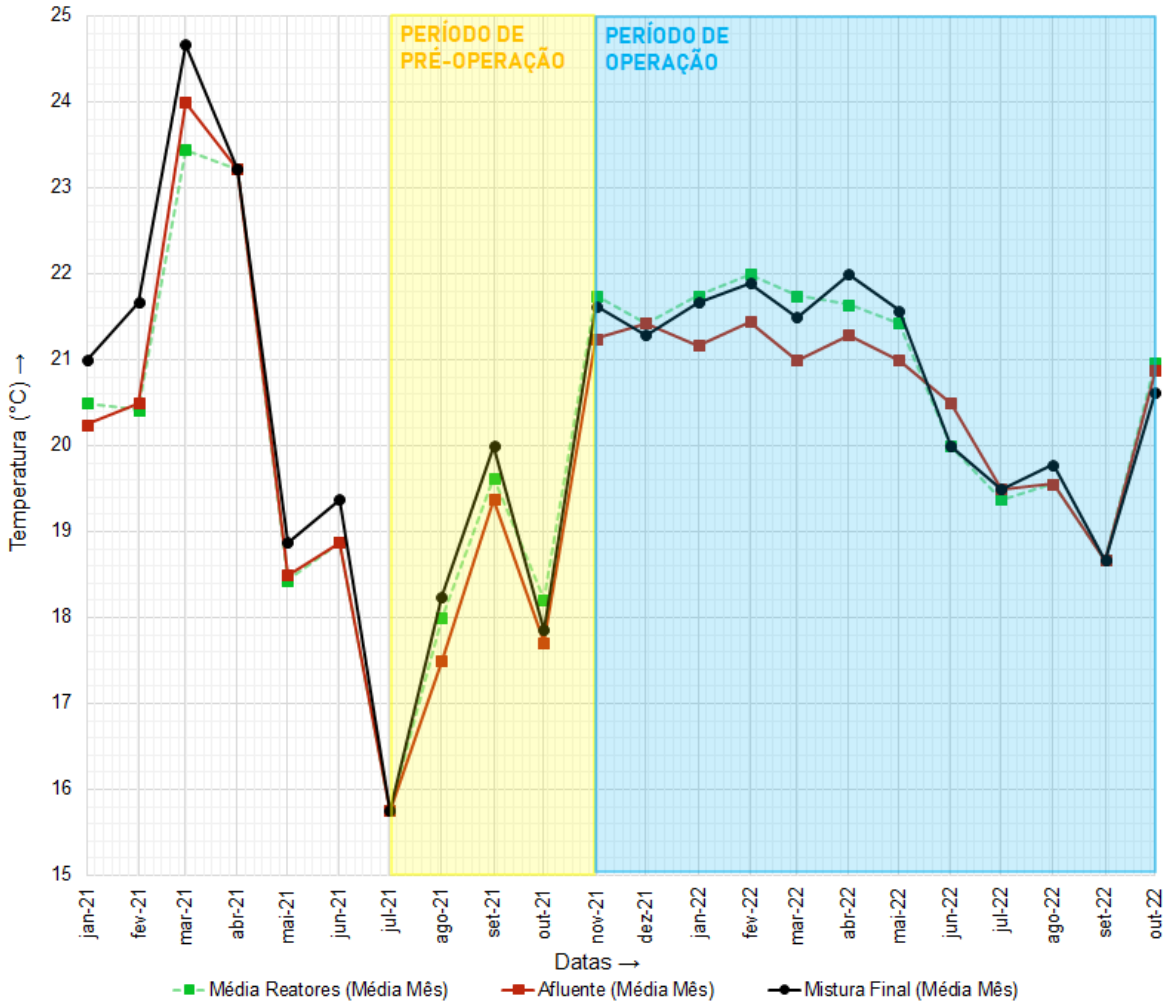
A resolução CONAMA 430/2011 no artigo 16 cita que:

I - condições de lançamento de efluentes:

b) temperatura: inferior a 40ºC, sendo que a variação de temperatura do corpo receptor não deverá exceder a 3ºC no limite da zona de mistura;

No Gráfico 5.12 pode-se observar que não há uma variação expressiva dos valores da temperatura do efluente, compreendendo os intervalos de 15ºC a 25ºC. Entende-se que a temperatura do efluente, em geral, tende a se aproximar da temperatura ambiente. De acordo com o coeficiente de correlação Pearson utilizado há uma correlação de 0,7, ou seja, considerado forte.

Gráfico 5.12 - Variação da temperatura



Fonte: Autoras (2022).

5.2.7 VAZÃO

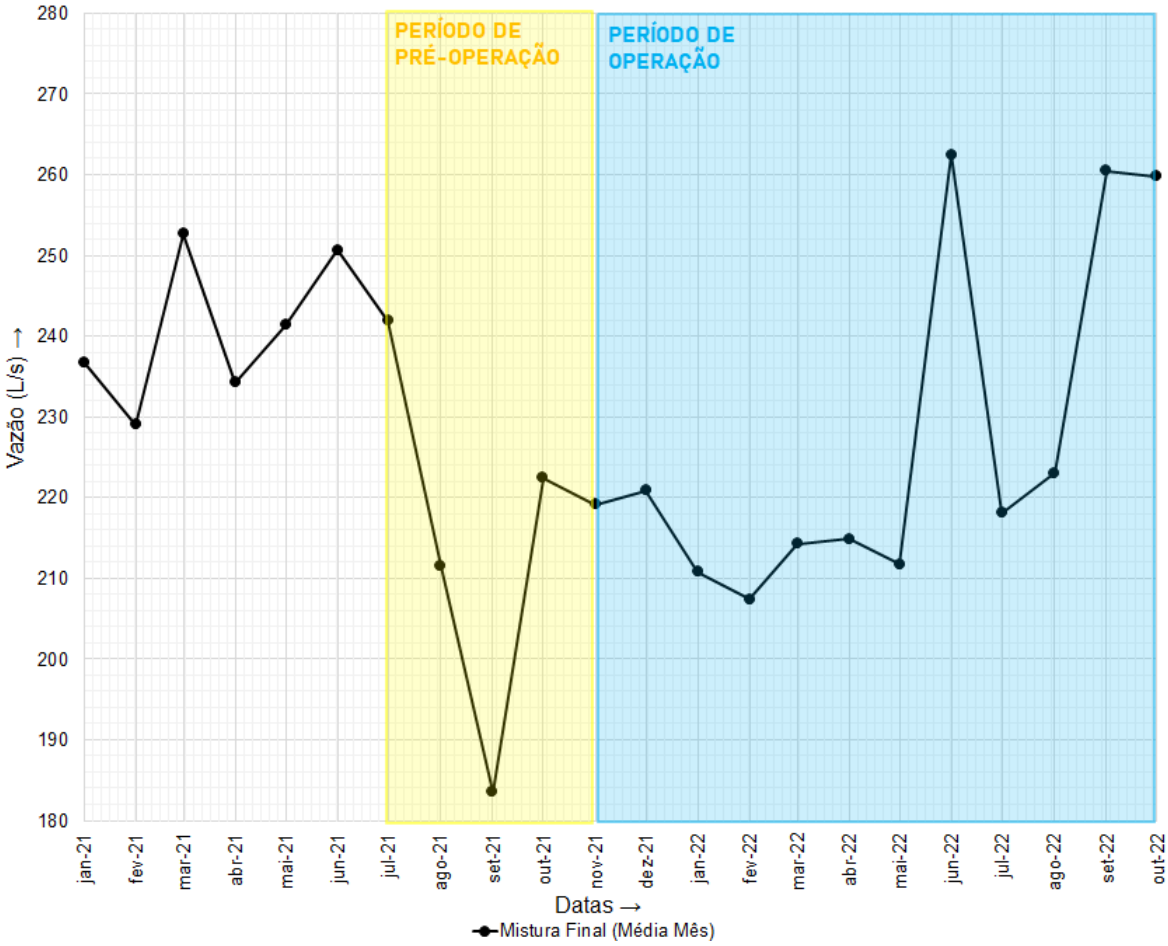
Como visto no item 3.2 deste estudo, o sistema adotado pela cidade de Ponta Grossa é o do tipo separador absoluto. A verificação dos valores de vazão é feita devido à ocorrência de vários fatores, dentre eles:

- dados de precipitação;
- infiltrações na rede;
- meses em que há maior gasto de água na cidade.

Dentro da ETE Verde não houve aumento da vazão de projeto com a inclusão do sistema de MBBR e flotação, ou seja, a variação de vazão não ocorre devido a tal inserção. A verificação de vazão de ETE Verde é medida apenas no ponto de efluente final e feita semanalmente.

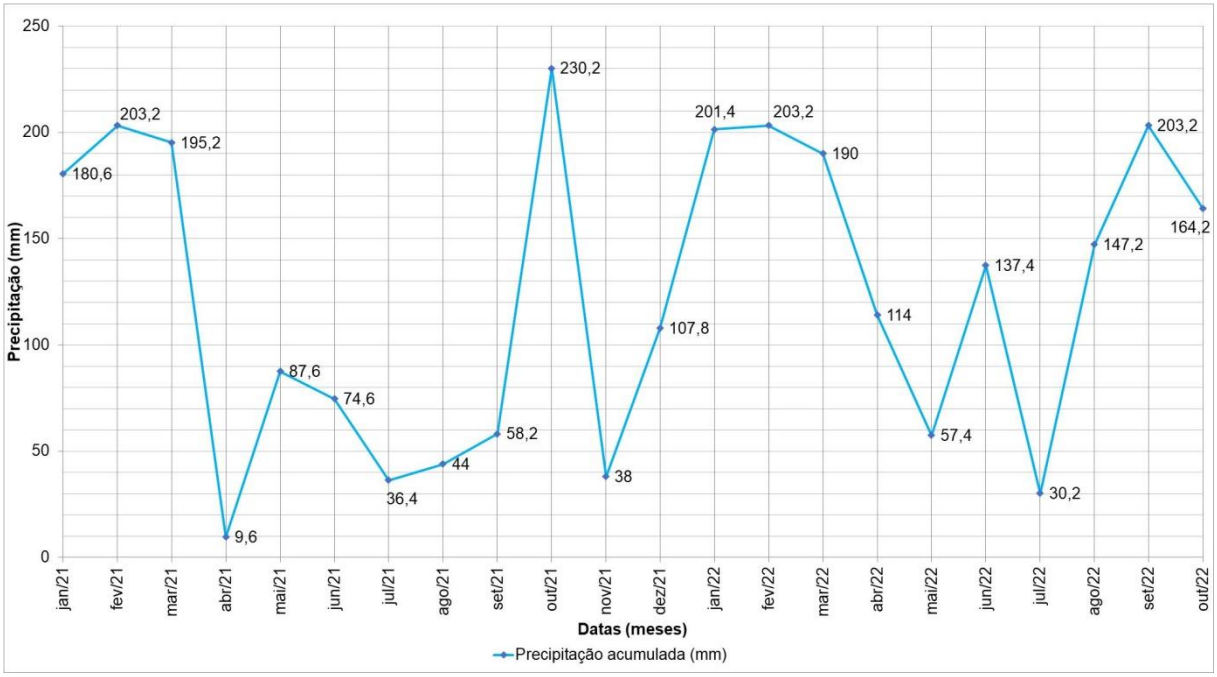
Com os dados obtidos pelo monitoramento da vazão do efluente no período em estudo é possível observar que o sistema opera com uma vazão média de 228 L/s, isto é, referente a 81,42% da sua vazão de projeto.

Gráfico 5.13 - Variação da vazão (L/s)



Fonte: Autoras (2022).

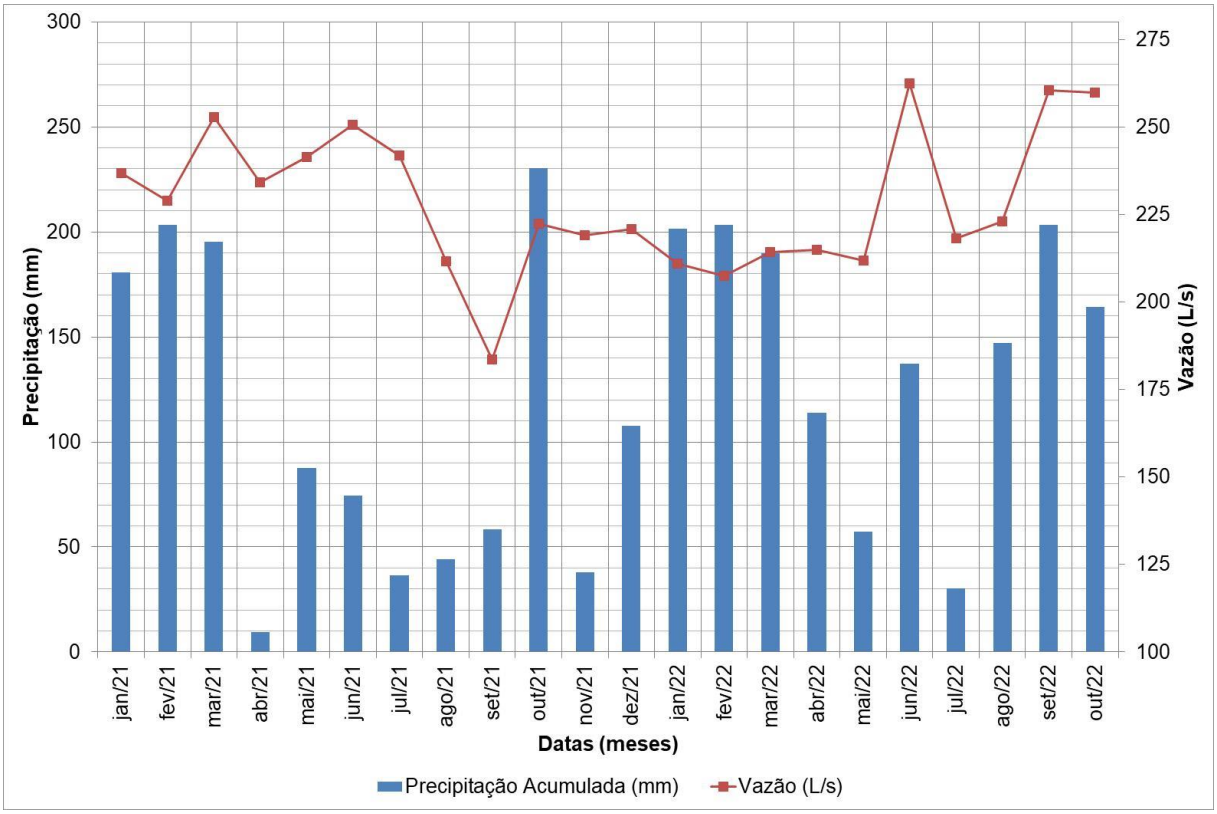
Gráfico 5.14 - Precipitação Acumulada



Fonte: Autoras (2022).

Conforme analisado nos gráficos é possível afirmar que nos meses de fev/21, out/21 e ago/22 houve um aumento considerável de vazão de esgoto devido ao aumento de precipitação mensal. Já nos meses de agosto e set/21, houve um decréscimo tanto na vazão de esgoto quanto na precipitação. Por meio dessas variações é possível verificar que, conforme explanado por Hanai e Campos (1997), as mudanças climáticas afetam diretamente o consumo de água e consequentemente a produção de efluentes, pois, além da contribuição doméstica, a água da chuva se infiltra no solo e depois nas redes coletoras, contribuindo para o volume de esgoto. No gráfico 5.15 se verifica a comparação entre a precipitação acumulada e a vazão da ETE Verde.

Gráfico 5.15 - Comparação entre precipitação acumulada e vazão da ETE

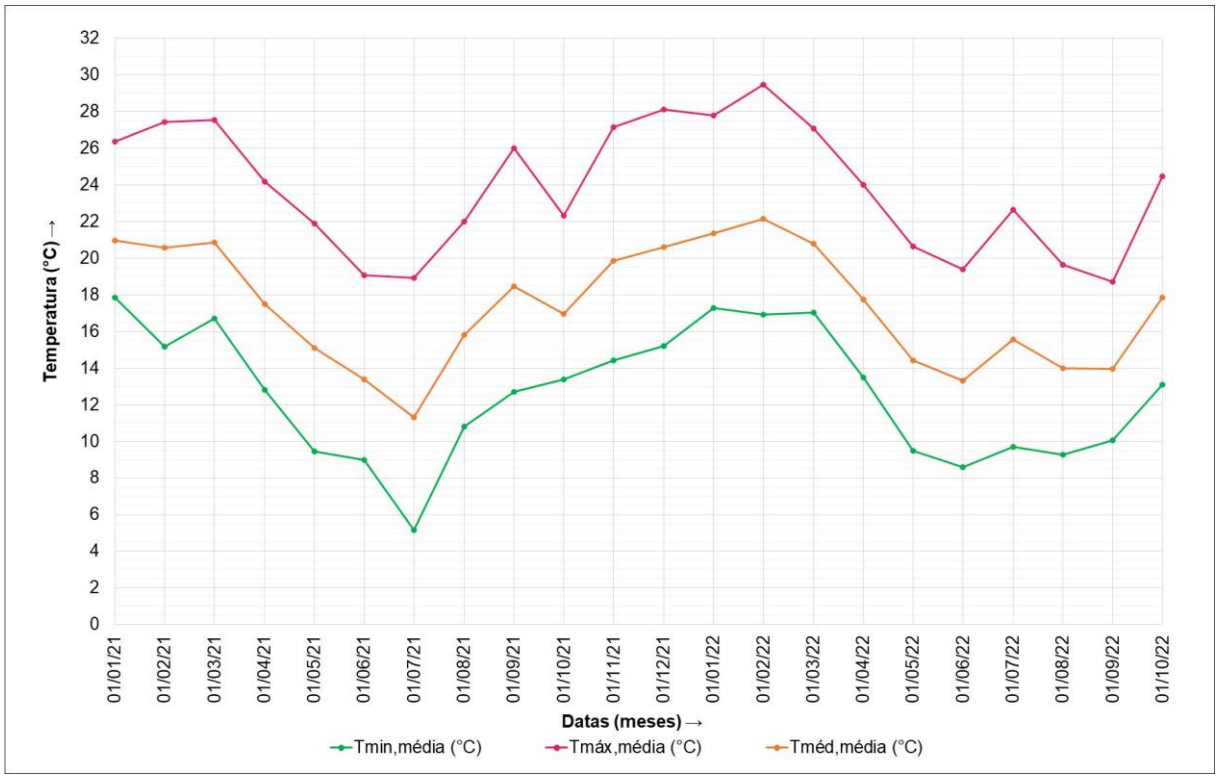


Fonte: Autoras (2022).

5.2.8 AVALIAÇÃO DE INFLUÊNCIA DE TEMPERATURA E CHUVA

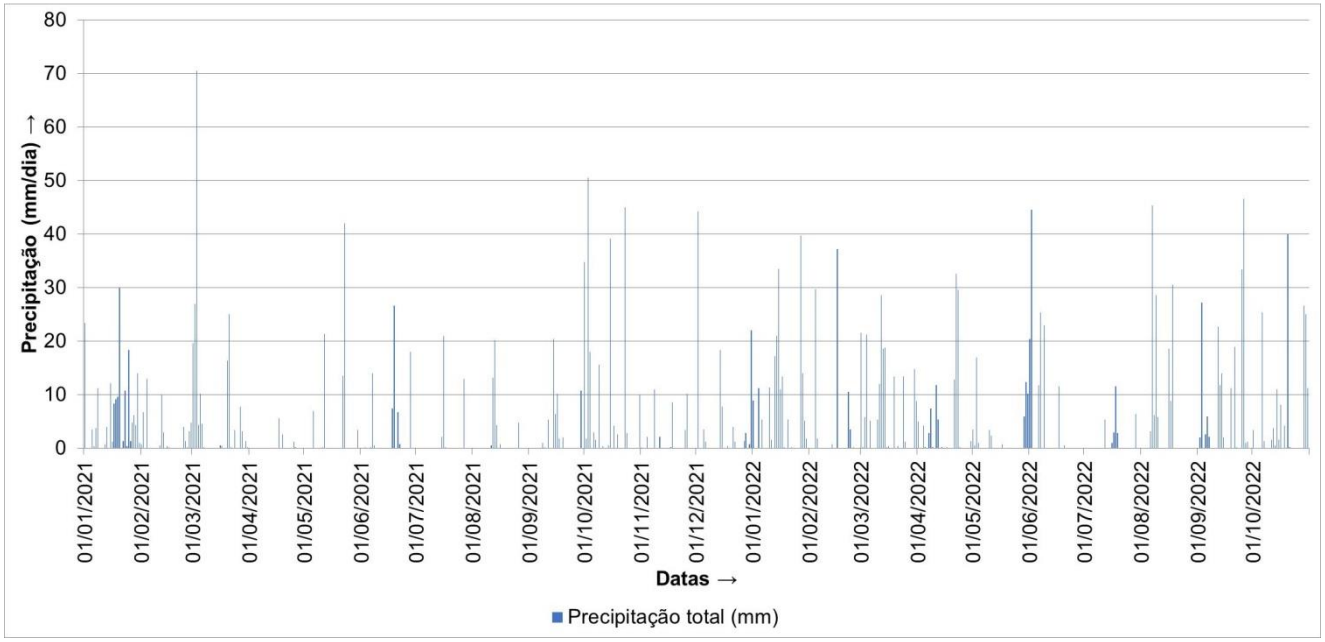
Por meio da correlação de Pearson obtém-se o valor de 0,44, ou seja, afirma-se, portanto, que existe uma relação moderada da precipitação mensal com a temperatura média na cidade de Ponta Grossa. Conforme os dados obtidos pelo SIMEPAR, analisou-se que a menor temperatura mínima da cidade é datada do dia 20/07/2021 de -2°C, e a maior temperatura máxima no dia 03/01/2022 de 33,1°C. Já o dado de maior precipitação é registrado no dia 03/03/2022 com 70,6 mm de chuva, com um registro de vazão de efluente de 246 L/s no dia 04/03/2022. Como citado anteriormente, a temperatura e precipitação do município influenciam diretamente no projeto de uma estação de tratamento de esgoto, pois interfere na concentração e evaporação do esgoto.

Gráfico 5.16 - Variação das temperaturas do ar



Fonte: Autoras (2022).

Gráfico 5.17 - Precipitação total mensal em Ponta Grossa - PR

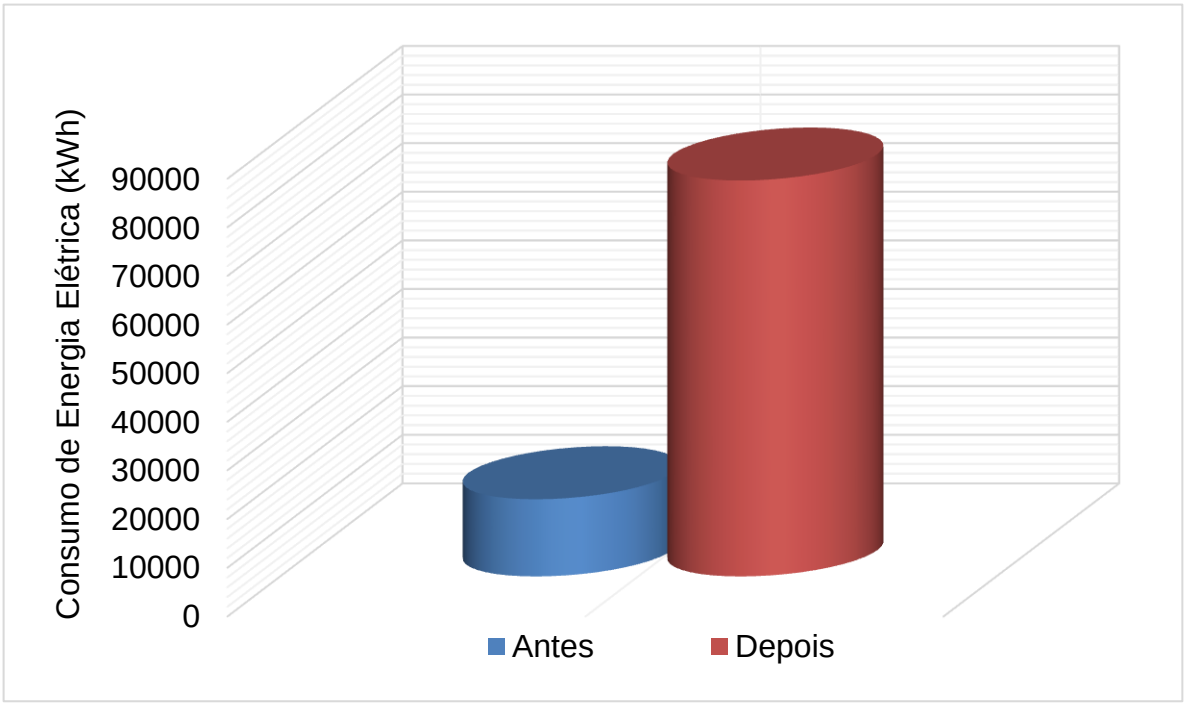


Fonte: Autoras (2022).

5.3 CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NA ETE

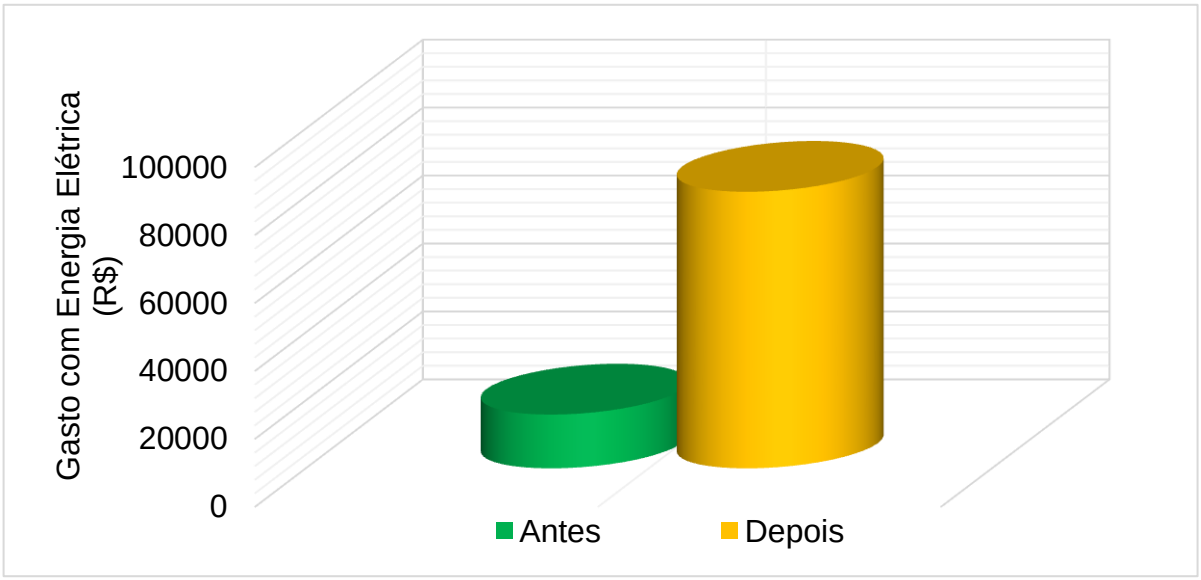
Conforme apresentado no Gráfico 5.18 e Gráfico 5.19 houve um considerável aumento no que diz respeito ao consumo e valor gasto com a energia elétrica na ETE Verde após o início de operação do sistema.

Gráfico 5.18 - Consumo energético da ETE



Fonte: Autoras (2022)

Gráfico 5.19 - Gasto com energia elétrica na ETE



Fonte: Autoras (2022).

Para isso, foram fornecidas duas faturas de energia da ETE Verde, sendo uma de junho/2021, anterior ao início da operação e a outra, do mês de agosto/2022, em pleno funcionamento. Na Tabela 5.2 encontra-se o consumo energético detalhado por unidade, para a ETE Verde.

Tabela 5.2 - Consumo Energético de cada unidade do sistema

	QTD total	QTD operando	P.inst (Kw/h)	h/d	% h/d	Consumo un (kW/d)	Consumo dia (kW/d)
Conjunto bomba submersível para alimentação do MBBR	2	1	55,12	24	20,0	1322,88	1322,88
Soprador de ar MBBR (40m³/min) - Frequência 100%	2	1	49,47	24	100,0	1187,28	1187,28
Floculador Mecânico – Agitadores	2	2	1,50	24	100,0	36,00	72,00
Flotador Primário - FAD (completo)	1	1	56,70	24	100,0	1360,80	1360,80
Conjunto bomba dosagem de coagulante para flotação	2	1	0,50	24	100,0	12,00	12,00
UAP 1000 para FAD	1	1	2,20	7	29,2	15,40	15,40
Bomba polímero para FAD	2	1	1,10	24	100,0	26,40	26,40
Conjunto bomba descarte de lodo flotado (2,5m³/h)	2	1	2,20	24	100,0	52,80	52,80
Misturador tanque de equalização de lodo	1	1	1,50	24	100,0	36,00	36,00
Conjunto bomba alimentação da desidratação mecanizada	2	1	2,20	8	33,3	17,60	17,60
Unidade de preparo de polímero - UAP500 (desidratação)	1	1	1,50	5	20,8	7,50	7,50
Dosagem de polímero desidratação	2	1	101,00	8	33,3	808,00	808,00
Equipamento desidratação mecanizada - Decanter	2	1	12,86	8	33,3	102,88	102,88

Potência total instalada	287,85
Total consumo diário	5021,54

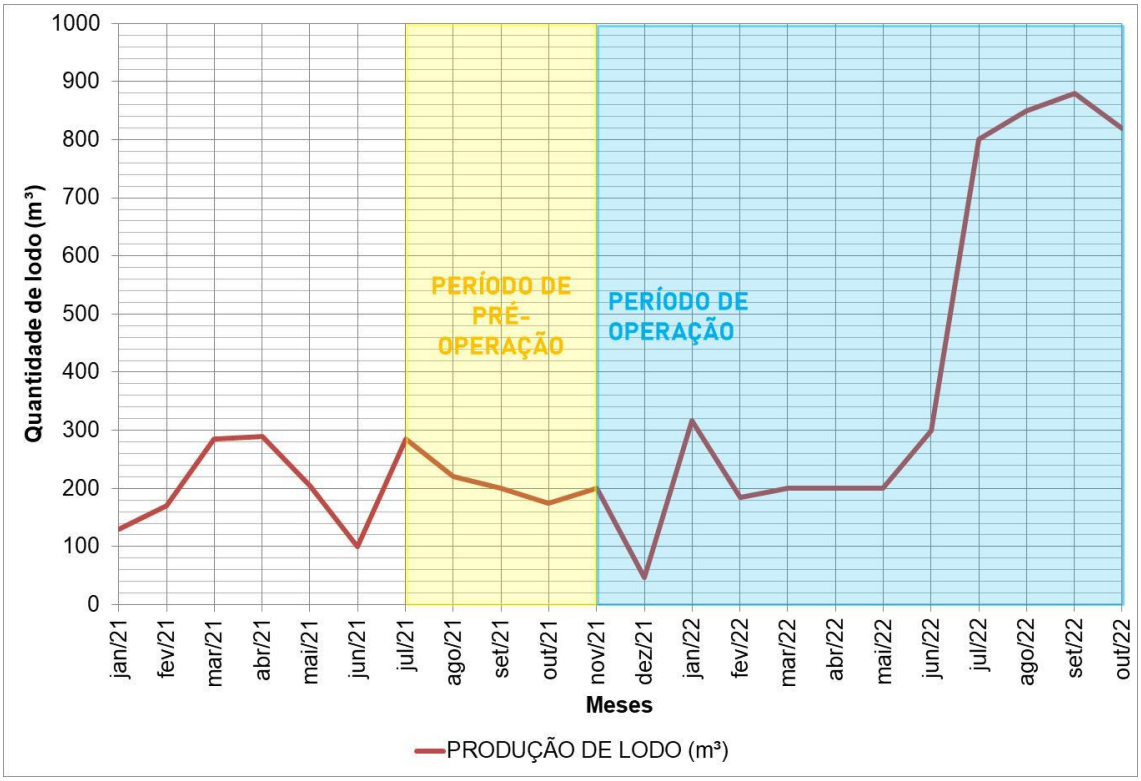
Fonte: GRATT, Memorial de cálculo (2020).

5.4 PRODUÇÃO DE LODO

Para a análise da produção de lodo gerada pela ETE, leva-se em consideração principalmente os meses em que há alta precipitação mensal. Quando há um aumento no volume de chuvas o sistema de flotação é desativado, pois o efluente dilui e se enquadra nos parâmetros solicitados à Companhia. O processo físico-químico é o maior responsável pela produção em larga escala de lodo.

Por meio do Gráfico 5.20, verifica-se que há um aumento expressivo na produção de lodo nos meses de julho, agosto, setembro e outubro de 2022. A média de produção de lodo antes da implantação do tratamento físico-químico de flotação era de 196,67 m³/mensal, a partir da implantação, ou seja, desde a pré-operação, essa média ascende para 367,3 m³/mensal. O aumento em percentual é de 46,45% mensal de produção de lodo.

Gráfico 5.20 - Produção de lodo



Fonte: Autoras (2022).

6 CONCLUSÃO

A partir do estudo técnico detalhado e de visitas técnicas, foi possível descrever o novo sistema implantado na ETE Verde para complementar o tratamento de esgoto depois do tratamento anaeróbio por RALF. As unidades instaladas foram uma estação elevatória, um reator aeróbio do tipo Reator de Biofilme de Leito Móvel denominado de MBBR e unidades de clarificação compostas por tanque de coagulação, floculador, flotador físico-químico por ar dissolvido.

Sistemas auxiliares como tanques de produtos químicos, bombas, tanque de coleta de lodo flotado, bomba de descarte de lodo para desidratação caçambas foram necessários. Todos estes elementos foram confeccionados em aço inox e foram dimensionados considerando a vazão nominal de 150 L/s que corresponde atualmente a 53% de toda a vazão da ETE que é de 280 L/s.

De acordo com as análises de monitoramento qualitativo tanto o efluente final tratado pela lagoa de estabilização e tratado pelo MBBR e flotador, apresentaram enquadramento nos limites máximos permitidos para lançamento no corpo hídrico pela Portaria nº 72/2019 sendo abaixo de 50 mg/L para a DBO, abaixo de 150 mg/L para a DQO e abaixo de 1mL/L para os sólidos sedimentáveis. Concluiu-se que o tratamento do efluente do reator anaeróbio foi adequado tanto com a lagoa de estabilização como com o MBBR e flotador, porém, com o novo sistema houve um aumento da eficiência de remoção de DBO em 6,8% e de DQO em 7,7%.

Destacam-se como principais vantagens do MBBR com relação à lagoa é que o sistema é feito em módulos podendo ser transportado ou ampliado de acordo com a necessidade o que lhe confere maior versatilidade, há possibilidade de maior controle das condições operacionais podendo imprimir maior rigor no tratamento em tempo real do monitoramento das variáveis.

Como principais desvantagens a complexidade operacional, o custo com o tratamento e o aumento de energia elétrica na ETE Verde foram consideráveis uma vez que houve o consumo de energia foi cinco vezes maior após a instalação do MBBR. As bombas submersíveis para alimentação do MBBR, o soprador de ar para manter as biomidias em suspensão e em condições aeróbias e mais o flotador por ar dissolvido foram as unidades que mais apresentaram consumo de energia elétrica. Além disso, a média de produção de lodo na ETE aumentou 46% de 196,67 m^3/mensal para 367,3 m^3/mensal.

Pode-se afirmar então, que o MBBR é o sistema mais apropriado para essa estação, pois ocupa menor área efetiva, já que muitas vezes não há possibilidade de construção de uma lagoa devido à grande área que ela ocupa, além de possibilitar maior controle de odor, principalmente porque existem residências bem próximas a ETE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 12209 – **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários,** Rio de Janeiro/RJ: ABNT, 2011.

APPOLINÁRIO, Fábio**. Metodologia da Ciência: filosofia e prática da pesquisa**. 2 ed. São Paulo: Editora Cengange Learning, 2012.

BARROS, R. T. V. **Saneamento**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG/MG, 1995. (Manual de saneamento e proteção ambiental para os municípios – volume 2).

BARROS, R. **A história do saneamento básico no Brasil**. 2014. Disponível em: <http://www.rodoinside.com.br/a-historia-do-saneamento-basico-no-brasil/>. Acesso em: 05 mai. de 2022.

BERNARDES, R.S.; SOARES, S. R. A.; **Esgotos combinados e controle da poluição:** estratégia para planejamento do tratamento da mistura de esgotos sanitários e águas pluviais. Brasília: CAIXA, 2004.

BEZERRA, LUIZ FERNANDO AND MATSUMOTO, TSUNAO; Evaluation of carbonaceous organic matter and nitrogen removal of wastewater in membrane bioreactor. Engenharia Sanitaria e Ambiental [online]. 2011, v. 16, n. 3 [Accessed 6 December 2022], pp. 253-260. Available from: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000300008>. Epub 20 Oct 2011. ISSN 1809-4457. https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000300008.

BLOG BRK AMBIENTAL. **5 tecnologias que estão revolucionando o saneamento no Brasil.** *[S.l.].* Surgiu, 2019. Disponível em: https://surgiu.com.br/2019/06/11/5-tecnologias-que-estao-revolucionando-o-saneamento-no-brasil/. Acesso em: 10 dez. 2022.

BRASIL. **Lei nº 14.026**, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000 (...). Diário Oficial da União, Brasília, 15 jul. 2020. Disponível em: www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm. Acesso em: 10 dez. 2022.

CAMPOS JUNIOR, D. J.; SOUZA, G. A. D. B.; Sustentabilidade: um estudo sobre o processo de flotação por ar dissolvido (FAD) e uma estação de tratamento de água da região metropolitana de Belo Horizonte na remoção de algas cianobactérias e turbidez; **Revista EA**; 2016.

CHERNICHARO, C.A.L.; CAMPOS, C.M.M. (1995). **Apostila de tratamento anaeróbio de esgotos,** DESA/UFMG.

CHERNICHARO, C.A.L.; **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios,** Belo Horizonte/MG: UFMG, 2001.

CHERNICHARO, C.A.L.; **Reatores anaeróbios,** Belo Horizonte/MG: UFMG, 2016.

COSTA, Bertoldo Silva. **Universalização do saneamento básico: utopia ou realidade - a efetivação do capital social na política pública do saneamento básico.** 2012. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2010. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/94690. Acesso em: 10 dez. 2022.

CRUZ, G. J. G.; **O acúmulo de lodo em lagoas de estabilização no tratamento de esgoto sanitário doméstico:** estudo de caso das lagoas do município de Ponta Grossa, Paraná; Dissertação (Mestrado Profissional): Meio Ambiente Urbano e Industrial; Curitiba/PR; 2013.

GRATT. Memorial de cálculo. **ETE Verde, Mar, 2020.** Pregão Eletronico nº 1653/2019.

GUSS, Josiane; Tratamento de Esgoto - Parte II. Disponível em: <https://www.josianeguss.com/2011/11/tratamento-de-esgoto-parte-ii.html>. Acesso em: 03 maio 2022.

IBGE. **Dados do IBGE da Cidade de Ponta Grossa.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/ponta-grossa/panorama>. Acesso em: 20 abr. 2022.

ETCHEPARE, R. G.; **Tratamento de Água:** Flotação; Material de aula: Tratamento de água; 2016.

EXPERT, Acqua. Ph **Você sabe para que serve este monitoramento na sua ETE?.** 23 jul. 2018. Disponível em: https://acquaexpert.com.br/voce-sabe-para-que-serve-o-monitoramento-do-ph-na-sua-ete/#:~:text=Influi%20em%20variados%20equilíbrios%20químicos,a%20fisiologia%20de%20diversas%20espécies. Acesso em: 10 dez. 2022.

HANAI, F. Y.; CAMPOS, J. R. **Avaliação da infiltração na rede coletora de esgotos na bacia do Ribeirão do Ouro da cidade de Araraquara**, SP. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1997, Foz do Iguaçu. Anais. Foz do Iguaçu, 1997.

HOWE, Kerry J. et al. **Princípios de tratamento de água.** São Paulo: Cengage Learning, 2016. 624 p. Tradução Noveritis do Brasil.
IPLAN - Ponta Grossa; **Plano Diretor:** hidrografia - Bacias e sub-bacias. Disponível em: https://iplan.pontagrossa.pr.gov.br/iplan/. Acesso em: 09 ago. 2022.

JORDÃO, E. J.; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** 6ª edição. CETESB, 1975.

MACHADO, A. S.; BORJA, P. C.; MORAES, L. R. S.; Desafios e oportunidades para a implantação de uma das propostas do PEMAPES: o sistema combinado; **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, *[S. l.]*, v. 1, n. 2, p. 234–250,

2013. DOI: 10.9771/gesta.v1i2.8436. Disponível em: https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/8436. Acesso em: 9 ago. 2022.

MADAN, S.; MADAN, R.; HUSSAIN, A. Advancement in biological wastewater treatment using hybrid moving bed biofilm reactor (MBBR): a review. **Applied Water Science**, v. 12, n. 6, p. 1-13, 2022.

MENDES, P. R. A.; **Sistemas de esgoto sanitário**; Material de aula: Tratamento de Águas Residuárias; 2020.

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

MIERZWA, J. C.; **Novo marco do saneamento pode modernizar sistemas de tratamento.** Jornal da Universidade de São Paulo - USP; 2020.

MUMFORD, L. **A cidade na história.** São Paulo: Martins Fontes, 1998.

ODEGAARD, H**.;** Innovations in wastewater treatment: The moving bed biofilm process; **Water Science & Technology** 53(9):17-33, 2006.

OLIVEIRA, Daniel Vieira Minegatti de; **Avaliação da remoção de nitrogênio via nitrificação e desnitrificação simultânea em um reator biológico com leito móvel (IFAS)**; Tese (Doutorado): Engenharia Civil; Universidade de São Paulo; São Paulo/SP; 2015.

OLIVEIRA, Daniel Vieira Minegatti de; VOLSCHAN JUNIOR, Isaac; PIVELI, Roque Passos**. Avaliação comparativa entre custos dos processos MBBR/IFAS e lodo ativado para o tratamento de esgoto sanitário.** Revista DAE, n. 193, p. 46-55, 2013.

OLIVEIRA, LUCAS ALVES DE. **Avaliação de desempenho de sistema MBBR em escala piloto**. 2019. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Química) - ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST, [*S. l.*], 2019.

OLIVEIRA, D. V. M.; VOLSCHAN JUNIOR, I.; PIVELI, R. P. Avaliação comparativa entre custos dos processos MBBR/IFAS e lodo ativado para o tratamento de esgoto sanitário. **Revista DAE**, n. 193, p. 46-55, 2013.

RODGERS, M.; ZHAN, X.-M.; Moving-Medium Biofilm Reactors; **Reviews in Environmental Science and Biotechnology;** volume 2, pages213–224; 2003.

SANEPAR. **Sanepar amplia Estações de Tratamento de Esgoto em Ponta Grossa.** *[S.l.].* Sanepar, 2021. Disponível em: https://site.sanepar.com.br/noticias/sanepar-amplia-estacoes-de-tratamento-de-esgoto-em-ponta-grossa. Acesso em: 10 dez. 2022.

SAUER, K. et al. The biofilm life cycle: expanding the conceptual model of biofilm formation. **Nature Reviews Microbiology**, v. 20, n. 10, p. 608–620, 1 out. 2022.

SCHLUSAZ, M.; **Avaliação da eficiência da estação de tratamento de efluentes (ETE – Ronda, Ponta Grossa – PR) através da análise de parâmetros físico-químicos**; Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação): Bacharel em Engenharia Química; Universidade Tecnológica Federal do Paraná; Ponta Grossa/PR; 2014.

PMSB. **Terceira Revisão Plano Municipal de Saneamento Básico Ponta Grossa/PR**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.pontagrossa.pr.gov.br/files/pmsb_rev_2019-09.pdf>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2022.

TIRABOSCHI, M. H. F. de S**. Contribuição para concepção e análise de alternativas de tratamento de esgotos sanitários com base em princípios e critérios de sustentabilidade.** (Dissertação de Mestrado) São Carlos/SP, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), 2004.

VON SPERLING, M**. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos.** Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v. 1. 3º ed. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

VON SPERLING, M.; **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 4ª. ed. v. 1. Belo Horizonte/MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA; Editora UFMG, 2014.

VON SPERLING, M.; **Lagoas de estabilização**. 3ª. ed. v. 1. Belo Horizonte/MG: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA; Editora UFMG, 2017.

WAGNER, L. F.; **Avaliação do lançamento de lodo de ETA actiflo em ETE com reator anaeróbio no município de Ponta Grossa-PR**; Dissertação (Mestrado): Engenharia Sanitária e Ambiental, área de Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos; Universidade Estadual de Ponta Grossa; Ponta Grossa/PR; 2015.

ZILLI, RAILENE PEZENTE. **Influência do tempo de retenção hidráulica e da velocidade superficial do ar no desempenho de um reator de leito móvel com biofilme (mbbr)**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, [*S. l.*], 2013.