



KARINA APARECIDA DE RESENDE

**DIAGNÓSTICO E AVALIAÇÃO TÉCNICO-FINANCEIRA
DE ALTERNATIVAS PARA O TRATAMENTO DE
ESGOTO DA CIDADE DE ITUTINGA-MG**

LAVRAS – MG

2021

KARINA APARECIDA DE RESENDE

**DIAGNÓSTICO E AVALIAÇÃO TÉCNICO-FINANCEIRA DE ALTERNATIVAS
PARA O TRATAMENTO DE ESGOTO DA CIDADE DE ITUTINGA-MG**

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

Prof. Dr. Mateus Pimentel de Matos
Orientador

LAVRAS-MG

2021

KARINA APARECIDA DE RESENDE

**DIAGNÓSTICO E AVALIAÇÃO TÉCNICO-FINANCEIRA DE ALTERNATIVAS
PARA O TRATAMENTO DE ESGOTO DA CIDADE DE ITUTINGA-MG**

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

APROVADA em 07 de junho de 2021.
Dr. Mateus Pimentel de Matos UFLA
Dra. Paula Peixoto Assemany UFLA
Dr. Lucas Cardoso Lima UFLA
Msc. Sany Laisla de Paula UFLA

Prof. Dr. Mateus Pimentel de Matos
Orientador

**LAVRAS-MG
2017**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus primeiramente, por me proporcionar perseverança para concluir esta etapa de minha vida.

A minha família, em especial aos meus pais, Rosilane Aparecida da Silva Resende e Hélio Ribeiro de Resende, pelo incentivo, força e amor incondicionais em todos os momentos, por me fazerem acreditar que eu seria capaz e por todo esforço investido na minha educação. Vocês são alicerce para as minhas realizações.

Ao meu namorado, Mário Teixeira Campos Junior, pela compreensão nos momentos dedicados ao estudo, pelo incentivo, paciência e por nunca ter soltado a minha mão.

Aos meus amigos de caminhada, Beatriz, Giovana, Izabela, Jonathan, Larissa, Maria de Lara, Rafael e Virgínia, agradeço pela cumplicidade durante esses anos. Sem vocês a graduação teria se tornado mais difícil.

Agradeço ao Núcleo de Estudos em Microbiologia Aplicada ao Saneamento Ambiental (NEMASA), ao qual serei eternamente grata pela oportunidade. O núcleo foi fundamental para que eu pudesse desenvolver minhas habilidades.

A Preserva Jr., a todos os amigos que conquistei, por ter me proporcionado uma vivência empresarial completa, por desenvolver minha liderança e trabalho em equipe, e por ter me apresentado um de seus valores, o TRANSBORDAR, o qual sempre se aplica em tudo o que faço.

Agradeço a todos os meus professores do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal de Lavras (UFLA) pela excelência da qualidade de ensino de cada um.

Ao meu orientador Prof. Dr. Mateus Pimentel de Matos, serei eternamente grata pela paciência, motivação e por compartilhar seus conhecimentos comigo. Seu amor pelo ensino e pesquisa é inspiração.

E por fim, agradeço aos membros da banca, Paula, Sany e Lucas por terem aceitado o convite.

MUITO OBRIGADA!

RESUMO

A cobertura com serviços de saneamento no Brasil ainda é baixa, sobretudo em municípios de menor porte e em pequenas comunidades, em razão da menor disponibilidade financeira, o que pode resultar em impactos econômicos, sociais e ambientais. Em Itutinga, cidade do interior mineiro e de baixo contingente populacional, 100% do esgoto urbano é coletado e tratado em uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) principal (sistema australiano de lagoas) e em soluções descentralizadas, compostas por ETEs compactas (com fossas sépticas e sumidouros) e por fossas negras. No entanto, em razão da contribuição de águas de chuvas e subdimensionamento das unidades, há problemas na operação das fossas, havendo necessidade diária de bombeamento e codisposição dos rejeitos acumulados na entrada da ETE principal, sobretudo quando há registros de precipitação. Assim, o presente trabalho objetivou realizar um diagnóstico da situação sanitária do município e propor alternativas para a substituição das ETEs compactas e fossas negras comunitárias existentes, tendo como base critérios técnicos e financeiros. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que o afluente da ETE principal de Itutinga é mais concentrado do que o esgoto típico, em função da codisposição do material bombeado nas fossas sépticas e negras, sendo a DBO de 408 mg L^{-1} , enquanto que no esgoto típico brasileiro a DBO é de $200\text{-}300 \text{ mg L}^{-1}$. O diagnóstico, por sua vez, indicou que 28% das residências e estabelecimentos têm o seu esgoto encaminhado para fossas negras, 29% para ETEs compactas e 43% para a ETE principal. Dentre as opções analisadas para implementação no município, a configuração de lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa seria o mais indicado, em função dos menores custos, simplicidade de operação e manutenção, e conhecimento prévio dos servidores do município.

Palavras-chave: Codisposição; Custos; Fossas negras; Fossas sépticas; Lagoas de estabilização.

SUMÁRIO

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 8 |
| 1.1. | Saneamento no Brasil | 8 |
| 1.2. | Itutinga, MG..... | 9 |
| 2. | MATERIAL E MÉTODOS..... | 10 |
| 2.1. | Caracterização do município | 10 |
| 2.1.1. | Informações gerais do município | 10 |
| 2.1.2. | Informações da hidrografia do município | 11 |
| 2.1.3. | Diagnóstico da situação atual do município frente ao esgotamento sanitário | 12 |
| 2.2. | Característica do esgoto sanitário | 20 |
| 2.3. | Características do curso d'água | 22 |
| 2.4. | Carga poluidora lançada ao curso d'água | 25 |
| 2.5. | Requisitos necessários para disposição de esgoto no curso d'água..... | 26 |
| 2.6. | CrITÉrios para escolha do sistema de tratamento..... | 28 |
| 3. | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 30 |
| 3.1. | Diagnóstico do tratamento de esgotos de Itutinga | 30 |
| 3.2. | Avaliação da qualidade de água do Rio Grande e eficiências necessárias para disposição do esgoto sanitário | 39 |
| 3.3. | Características do esgoto | 40 |
| 3.4. | Avaliação de alternativas de tratamento de esgotos..... | 43 |
| 3.4.1. | UASB | 44 |
| 3.4.2. | Lagoa Anaeróbia (LAN) seguida por Lagoa Facultativa (LF)..... | 45 |
| 3.4.3. | Lagoas Facultativas (LF)..... | 49 |
| 3.4.4. | Lagoa Aerada Facultativa (LAF)..... | 50 |
| 3.4.5. | Lagoa Aerada de Mistura Completa (LAMC) seguida por Lagoa de Decantação (LD) | 55 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.4.6. | Lodo Ativado Convencional (LAC)..... | 58 |
| 3.4.7. | Lodo Ativado de Aeração Prolongada (LAP) | 66 |
| 3.4.8. | UASB seguido por Filtro Biológico Percolador (FBP)..... | 70 |
| 3.4.9. | UASB seguido por Biofiltro Aerado Submerso (BFAS) | 75 |
| 3.4.10. | Sistemas Alagados Construídos (SAC) | 78 |
| 3.5. | Escolha do tratamento..... | 80 |
| 4. | CONCLUSÕES | 83 |
| 5. | SUGESTÃO PARA FUTUROS ESTUDOS | 83 |
| 6. | REFERÊNCIAS | 83 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Saneamento no Brasil

Segundo o Instituto Trata Brasil (2018a), “saneamento é o conjunto de medidas que visa preservar ou modificar as condições do meio ambiente com a finalidade de prevenir doenças e promover a saúde”. É também um direito assegurado pela Constituição Federal (CF) e definido pela Lei nº 14.026 de 2020, como o conjunto dos serviços de abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza urbana, drenagem urbana, manejos de resíduos sólidos e de águas pluviais (BRASIL, 2020).

No entanto, o país ainda tem quase 35 milhões de pessoas sem acesso à água tratada, além de 100 milhões sem coleta de esgotos (INSTITUTO TRATA BRASIL, 2018b). E a situação tende a ser pior em municípios de menor porte em função da menor disponibilidade de recursos financeiros e de infraestrutura, além de possíveis fatores como a falta de políticas públicas, a menor disponibilidade de equipe técnica especializada e o menor nível de instrução da população relativa à educação sanitária (LISBOA; HELLER; SILVEIRA, 2013). Essa condição leva a grandes prejuízos ambientais, econômicos e de saúde (RIBEIRO; ROOKE, 2010; ORTIZ-CORREA et al., 2016), impactando direta e indiretamente na vida da população.

Pode-se citar como consequências da falta de infraestrutura de saneamento, o maior número de internações por diferentes doenças de veiculação hídrica; a redução do potencial turístico e de postos de trabalho; o encarecimento do tratamento de água; a diminuição da renda e desvalorização imobiliária; a alteração da qualidade de água, como a eutrofização do corpo hídrico, a diminuição da concentração de oxigênio dissolvido (OD) e aumento das concentrações e presença de toxinas, metais pesados e organismos patogênicos; além de prejuízos aos atributos químicos, físicos e biológicos do solo (VON SPERLING, 2014; FERREIRA et al., 2016; METCALF; EDDY, 2003; TRATA BRASIL, 2018c).

Pelos motivos descritos, é de grande importância o aumento dos índices de tratamento de esgotos e a elevação das eficiências de remoção de contaminantes das águas residuárias tratadas, buscando por alternativas que levem em conta as particularidades de cada município. Na definição do tratamento, deve-se considerar fatores como recursos financeiros, área disponível, características da água residuária e nível de tratamento necessário.

1.2. Itutinga, MG

O município de Itutinga, localizado na região Sudeste de Minas Gerais, possui uma população de 3.913 habitantes, sendo classificado como município de pequeno porte. Com economia baseada na agricultura, na fabricação de produtos alimentícios, na fruticultura, em mini latifúndios leiteiros, na extração mineral e no comércio local, possui Produto Interno Bruto (PIB) de R\$ 30.465,33 (IBGE, 2018), não sendo uma cidade de muitos recursos para investimento em soluções complexas de tratamento. Por essa condição, as administrações optaram pela utilização de um sistema de lagoas de estabilização, reatores de tratamento de baixos custos de instalação, operação e manutenção, além de menor exigência de mão de obra (XIAN-WEN, 1995; GIKAS; TSIHRINTZIS, 2014; HO; GOETHALS, 2020).

Uma primeira concepção, construída em meados dos anos de 1990, foi formada por cinco lagoas operadas em série, a primeira anaeróbia, seguida de três lagoas facultativas e uma lagoa de maturação. Dada à precariedade da operação, a Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) não atingiu a nenhum dos parâmetros previstos na Deliberação Normativa nº 1 de 2008 do COPAM/CERH (MINAS GERAIS, 2008; RESENDE, 2017). Dentre os problemas relatados por Resende (2017), cita-se a operação das lagoas facultativas recebendo elevadas cargas orgânicas, compatíveis com lagoas anaeróbias; e a falta de manutenção do sistema, havendo necessidade de remoção de lodo acumulado.

Em 2019, a ETE principal foi reconstruída, sendo reformulada para 2 lagoas anaeróbias, 1 lagoa facultativa e 1 lagoa de maturação. Além dessa ETE, existem ainda no município onze Estações de Tratamento de Esgoto do tipo compacta (ETEC), constituídas por caixa gradeada, filtro anaeróbio, tanque séptico e sumidouro; além de onze fossas negras comunitárias na área urbana. Assim sendo, de acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento (SNIS, 2019), 100% do esgoto produzido no município é coletado e submetido ao tratamento (dados de 2017).

Apesar de ter sido reportada uma melhora em relação ao que está disponível no Atlas de Esgotos (BRASIL, 2017), no qual cita que em 2013, 32,76% do esgoto não era coletado, nem tratado, 19,63% possuía solução individual e apenas 47,61% era coletado e tratado, a eficiência de tratamento proporcionado pelas ETES do município e soluções individuais mal operadas podem não ser suficientes para atendimento da legislação. Em Brasil (2017), está apresentado que da carga de DBO produzida, 88,22% ainda é despejada nos cursos d'água. Além disso, os dados fornecidos ao Atlas de Esgotos são de responsabilidade dos municípios, o que pode não representar a realidade.

Nesse contexto, em decorrência da necessidade de se elevar os níveis de tratamento

das concepções descentralizadas e compactas existentes no município, objetivou-se com a realização desse trabalho realizar um diagnóstico da situação sanitária do município de Itutinga e propor alternativas para a substituição das ETEs compactas e fossas negras comunitárias existentes tendo como base critérios técnicos e financeiros.

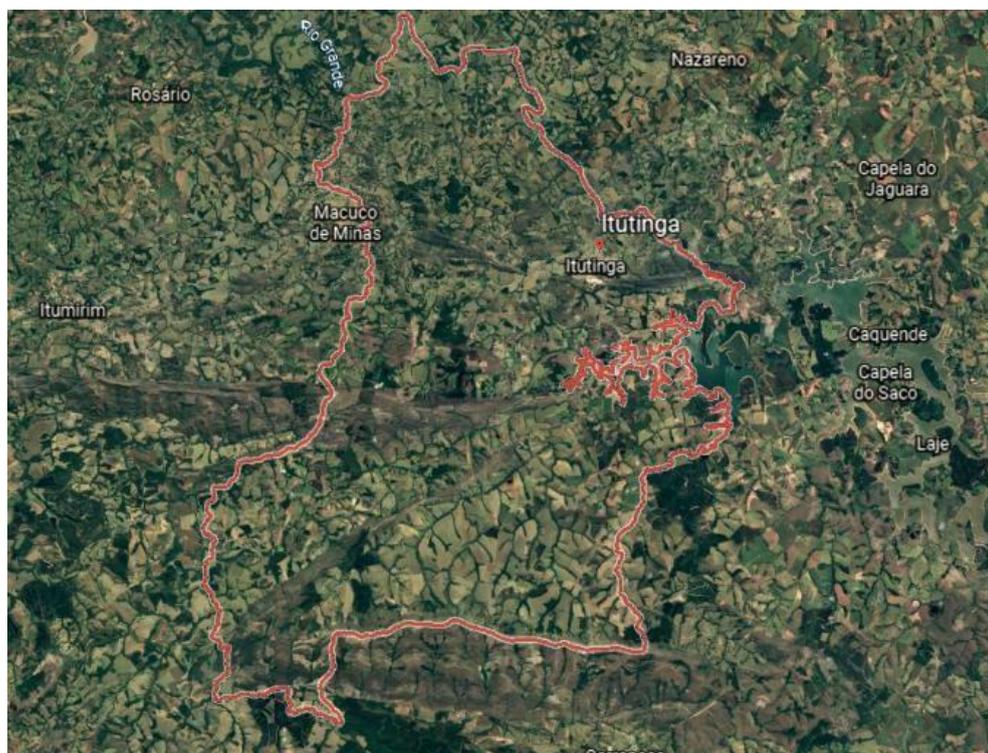
2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização do município

2.1.1. Informações gerais do município

Itutinga é um município mineiro, localizado na Mesorregião das Vertentes e na Microrregião de Lavras (Figura 1). Possui uma área territorial de 372,018 km², sendo que destes, 0,3682 km² constituem a zona urbana (IBGE, 2019). Segundo o último censo do IBGE (2010), o município possui uma população total de 3.913 habitantes, em que 2.756 habitantes residem na zona urbana e 1.157 na zona rural. Com base em projeções, é esperada que a população municipal tenha atingido no ano de 2020, cerca de 3.768 habitantes no total, havendo, portanto, redução do número de moradores.

Figura 1 – Localização do município de Itutinga-MG.



Fonte: *Google Earth* (2021).

O total de domicílios em Itutinga-MG no censo de 2010 do IBGE é de 1.882 domicílios, dos quais 1.109 estão na área urbana e 773 domicílios estão na zona rural. Considerando a população urbana no censo de 2010 do IBGE (2.756 habitantes), e o número de domicílios no período de análise (1.109 domicílios), é possível obter uma taxa de ocupação domiciliar de 2,5 hab dom⁻¹ (IBGE, 2010).

O clima no município é caracterizado como tropical mesotérmico brando semiúmido (Cwb, segundo Koppen), com invernos secos e amenos e verões chuvosos e com temperaturas elevadas. O mês mais quente é Janeiro, com uma temperatura média de 22,9 °C, e o mais frio é Julho, com uma temperatura de 16,9 °C. A precipitação média anual é de 1.433,3 mm, tendo menores índices pluviométricos em Julho (9,7 mm) e maiores lâminas precipitadas no mês de Dezembro (292,3 mm) (CARVALHO et al., 2010).

Em relação à estrutura de saneamento do município, esse possui uma Estação de Tratamento de Água (ETA) da COPASA, a qual trata vazão de 484 m³ d⁻¹, e atende 67,69% da população (SNIS, 2019). A captação é feita no Rio Grande.

No quesito tratamento de esgotos, Itutinga possui uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) principal, gerida por recursos próprios do município; onze Estações de Tratamento de Esgoto do tipo compacta (ETEC); além de onze fossas negras comunitárias.

2.1.2. Informações da hidrografia do município

A cidade de Itutinga é banhada por vários rios e córregos, sendo os principais, o Ribeirão do Macuco, o Rio Capivari e o Rio Grande, que fazem parte da Bacia do Alto Rio Grande (GD1). Conforme apresentado no Atlas de Esgotos, o corpo receptor da água residuária gerada no município é o Rio Grande (BRASIL, 2017), sendo que de acordo com o plano diretor da bacia hidrográfica do Alto Rio Grande (GD1), ao passar por Itutinga, esse está enquadrado na Classe 2 (IGAM, 2013). Portanto, essa condição deve ser preservada ou alcançada mesmo após o lançamento dos despejos, de forma que a água possa ser utilizada para os diferentes usos idealizados para a classe.

Como base nos dados disponíveis em Brasil (2017), a vazão de referência do rio (q_{7,10}) é de 53.932,4 Ls⁻¹, sendo que dados de 2013 apontavam que 1,2 L s⁻¹ de esgoto não tratado era despejado pelo município. Por outro lado, informações mais recentes, de 2017 do SNIS (BRASIL, 2019), apontam que houve uma melhoria das condições sanitárias municipais, havendo coleta e tratamento de todo o esgoto gerado em Itutinga. Os dados de qualidade do

curso d'água estão disponíveis na HIDROWEB e foram retirados da Estação Fluviométrica número 61065100 de Itutinga.

2.1.3. Diagnóstico da situação atual do município frente ao esgotamento sanitário

Segundo informações da Prefeitura Municipal de Itutinga (ITUTINGA, 2019), o município possui, atualmente, 1 ETE principal (Figuras 2a e b), constituída por sistema australiano de lagoas de estabilização (2 lagoas anaeróbias operando em série e 1 lagoa facultativa) e 1 lagoa de maturação; 11 ETECs (Figuras 3a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k), constituídas por caixa gradeada, filtro anaeróbio, tanque séptico e sumidouro; e 11 fossas negras comunitárias (Figuras 4a, b, c, d, e, f, g, h, i, j).

Figura 2a – Vista da ETE principal, no bairro Nossa Senhora do Rosário.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 2b – Vista da ETE principal, no bairro Nossa Senhora do Rosário.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 3a – Detalhe da ETEC 1, no bairro Ponte Alta.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 3b – Detalhe da ETEC 2, no bairro Ponte Alta.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 3c – Detalhe da ETEC 3, no bairro Ponte Alta.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 3d – Detalhe da ETEC 4, no bairro Jhon Pool.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 3e – Detalhe da ETEC 5, no bairro Jhon Pool.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 3f – Detalhe da ETEC 6, no bairro centro (PSF).



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 3g – Detalhe da ETEC 7, no bairro centro (UBS).



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 3h – Detalhe da ETEC 8, no bairro Jardim Bela Vista.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 3i – Detalhe da ETEC 9, no bairro Vale das Águas.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 3j – Detalhe da ETEC 10, no bairro Vale da Ribeira.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 3k – Detalhe da ETEC 11, no bairro Nossa Senhora do Rosário.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 4a – Detalhe da Fossa Negra 1 e 2, no bairro 111.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 4b – Detalhe da Fossa Negra 3, no bairro 111.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 4c – Detalhe da Fossa Negra 4, no bairro 111.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 4d – Detalhe da Fossa Negra 5, no bairro Nossa Senhora do Rosário.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 4e – Detalhe da Fossa Negra 6, no bairro Nossa Senhora do Rosário.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 4f – Detalhe da Fossa Negra 7, no bairro Jardim Bela Vista.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 4g – Detalhe da Fossa Negra 8, no bairro Jardim Bela Vista.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 4h – Detalhe da Fossa Negra 9, no bairro São Gabriel.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 4i – Detalhe da Fossa Negra 10, no bairro São Gabriel.



Fonte: Do Autor (2021).

Figura 4j – Detalhe da Fossa Negra 11, no bairro São Gabriel.



Fonte: Do Autor (2021).

Com o intuito de identificar a delimitação espacial das referidas unidades de tratamento, bem como o número de casas e estabelecimentos atendidos por cada uma das concepções de tratamento, foi feito um diagnóstico nas ruas do município com a presença de um funcionário da Prefeitura.

Para propiciar a estimativa da vazão de esgotos que é tratada por essas unidades descentralizadas, foi realizado o levantamento do número de casas e estabelecimentos comerciais atendidos por essas unidades em cada bairro. O volume de esgoto considerado no dimensionamento de cada fossa negra foi obtido por meio de consulta aos projetos dessas unidades na Prefeitura Municipal. A partir desse diagnóstico (número de residências atendidas por cada concepção de tratamento), considerou-se a taxa de ocupação domiciliar de 2,5 hab

dom⁻¹ a partir do total de edificações e do número de habitantes no município (IBGE, 2010).

Além do número de contribuintes, deve-se também considerar a contribuição de cada habitante na geração de esgotos, bem como a contribuição de cada estabelecimento comercial. Na Tabela 1, estão apresentadas faixas típicas de consumo de água em função do tamanho da comunidade atendida pelo abastecimento de água, segundo von Sperling (2017).

Tabela 1 – Faixas típicas de consumo per capita de água.

| Porte da comunidade | Faixa da população (hab) | Consumo per capita QPC (L hab ⁻¹ d ⁻¹) |
|-----------------------|--------------------------|--|
| Povoado Rural | < 5.000 | 90 – 140 |
| Vila | 5.000 – 10.000 | 100 – 160 |
| Pequena Localidade | 10.000 < 50.000 | 110 – 180 |
| Cidade média | 50.000 – 250.000 | 120 – 220 |
| Cidade grande | > 250.000 | 150 – 300 |

Fonte: von Sperling (2017).

Por se tratar de um município com população inferior a 5.000 habitantes, o QPC está entre 90 a 140 L hab⁻¹ d⁻¹ (VON SPERLING, 2017).

Na Tabela 2 estão apresentadas a contribuição diária de despejos por cada tipo de prédio e de ocupantes, segundo a NBR 13.969 (ABNT, 1997).

Tabela 2 – Contribuição de esgoto por cada tipo de prédio.

| Prédio | Unidade | Contribuição de esgoto (L d ⁻¹) |
|--|-----------------|---|
| Residência padrão alto | Pessoa | 160 |
| Residência padrão médio | Pessoa | 130 |
| Residência padrão baixo | Pessoa | 100 |
| Hotel | Pessoa | 100 |
| Alojamento provisório | Pessoa | 80 |
| Fábrica em geral | Pessoa | 70 |
| Escritório | Pessoa | 50 |
| Edifício público comercial | Pessoa | 50 |
| Escolas | Pessoa | 50 |
| Bares | Pessoa | 6 |
| Restaurantes e similares | Pessoa | 25 |
| Cinemas, teatros e locais de curta permanência | Lugar | 2 |
| Sanitários públicos | Bacia sanitária | 480 |

Fonte: NBR 13.969 (ABNT, 1997).

A partir dessas informações, é possível então estimar a vazão média, máxima e mínima de esgoto que esta sendo encaminhada a cada unidade de tratamento, conforme Equações 1, 2, e 3.

$$Q_{\text{med}} = \frac{P_t \times Q_{\text{PC}} \times R}{1000} \quad (1)$$

Em que:

- P_t = população (hab);
- Q_{PC} = quota per capita de consumo de água (L hab⁻¹d⁻¹);
- R = coeficiente de retorno (0,80);

$$Q_{\text{máx}} = Q_{\text{med}} \times K_1 \times K_2 \quad (2)$$

Com base na literatura, foram considerados K_1 (coeficiente de dia de maior consumo) igual a 1,2 e K_2 (coeficiente de hora de maior consumo) de 1,5 (TSUTIYA E SOBRINHO, 1999).

$$Q_{\text{mín}} = Q_{\text{med}} \times K_3 \quad (3)$$

Segundo Jordão e Pessoa (2011) o valor de K_3 (coeficiente de mínima vazão horária) corresponde a 0,5.

2.2. Característica do esgoto sanitário

Estão apresentadas na Tabela 3, as características típicas do esgoto sanitário com base em diferentes fontes de pesquisa.

Tabela 3 – Caracterização física, química, bioquímica e microbiológica do esgoto sanitário com base em diferentes fontes da literatura

| Fonte | Variáveis | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------------------------------|----------|-------|------------------|-------------------|------|-------|----------|---------|-------|--------|-------|---------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | DBO | DQO | NT | N _{org} | N _{amon} | PT | O & G | ST | SS | S | K | Na | pH | CT | CTerm | EC |
| | -----mg L ⁻¹ ----- | | | | | | | | | | | | - | -----NMP/100 mL----- | | |
| (1) | 100-400 | 200-800 | 20-85 | 10-35 | 10-50 | 5-20 | - | 370-1160 | 120-360 | 5-20 | - | - | 6,5-7,5 | 10 ⁶ -10 ⁹ | 10 ⁵ -10 ⁸ | 10 ⁶ |
| (2) | 250-400 | 450-800 | 35-60 | 15-25 | 20-35 | 4-15 | - | 700-1350 | 200-450 | 10-20 | - | - | 6,7-8,0 | 10 ⁶ -10 ¹⁰ | 10 ⁶ -10 ⁹ | 10 ⁶ -10 ⁹ |
| (3) | 20-400 | 170-1000 | 20-90 | - | 10-50 | 4-12 | - | 200-1200 | 100-500 | 5-20 | <10-60 | 24-47 | 6,8-7,2 | - | - | - |
| (4) | 308 | 746 | 55 | 22 | 33 | 9,5 | - | - | 256 | - | - | - | - | - | - | - |
| (5) | 230 | - | 47,10 | 2,30 | 37 | 8,7 | - | 745 | - | - | 25,70 | 77,20 | 6,35 | - | - | - |

Em que, DBO, DQO, NTK, PT, O & G, ST, SS, S, K, Na, pH, CT, CTerm, EC refere-se respectivamente à Demanda Bioquímica de Oxigênio, Demanda Química de Oxigênio, Nitrogênio Total Kjeldahl, Fósforo Total, Óleos e Graxas, Sólidos Totais, Sólidos Suspensos, Sedimentáveis, Potássio, Sódio, potencial hidrogeniônico, Coliformes Totais, Coliformes Termotolerantes e *E. Coli*.

(1) – Jordão e Pessoa (2011), (2) – Von Sperling (2017), (3) – Matos e Matos (2017), (4) - Calijuri et al.(2009), (5) - Guimarães et al. (2018).

No entanto, como nas redes coletoras do município há mistura das águas pluviais com o esgoto sanitário, diferindo da concepção adotada no Brasil de sistema separador absoluto, as características da água residuária podem ser diferentes das comumente encontradas em literatura, sobretudo para os meses mais chuvosos. Ainda assim, esses valores foram utilizados no trabalho pelo fato de que pretende-se encontrar soluções adequadas para o município e esse objetivo passa também por evitar a mistura de águas de chuva com o efluente sanitário.

Para possibilitar a comparação também foram compiladas informações sobre as características do esgoto sanitário de outros países que utilizam do sistema combinado ou unitário; e em complemento, de dados bimestrais do monitoramento da entrada e saída da ETE principal desde a sua reconstrução em 2019. As coletas e análises foram feitas por um laboratório externo contratado pela prefeitura. Essa análise permite conhecer as características do esgoto municipal que possui contribuição do lodo das fossas negras e das fossas sépticas das ETECs que impactam na sua qualidade. Diariamente um caminhão limpa fossas retira o resíduo acumulado e lança na entrada do sistema australiano de lagoas. Dessa forma, há choques de carga e vazão na estação, podendo prejudicar o seu desempenho e o atendimento aos parâmetros estabelecidos na legislação.

De acordo com informações obtidas no Portal da Transparência (BRASIL, 2020), o gasto diário com a retirada do resíduo é de R\$1.200,00, desse modo, em um ano o total gasto é de R\$456.250,00. Assim, é mais um fator que torna crítica a proposição de alternativas para o tratamento descentralizado do município.

As campanhas de monitoramento da ETE principal foram realizadas em 2019, nos meses de Abril, Maio, Julho, Agosto, Setembro, Outubro e Dezembro; e em 2020, nos meses de Maio e Novembro. Na entrada do sistema foram analisadas as variáveis DBO, DQO, Sólidos Sedimentáveis e *E. Coli*; e na saída, DBO, DQO, Sólidos Sedimentáveis, *E. Coli*, Óleos e Graxas, Cloreto Total, Fósforo Total e Nitrogênio Amoniacal. Os laudos dos resultados das análises foram disponibilizados para consulta na sede da Prefeitura, na Secretaria Municipal de Urbanismo e Meio Ambiente, e a partir deles, foi feita a média dos resultados das variáveis obtidas nas campanhas da entrada da ETE.

2.3. Características do curso d'água

A seguir serão apresentadas a média e o desvio padrão para os dados obtidos na HIDROWEB, que conta com uma série histórica de 1997 a 2020, possuindo até 94 dados para

algumas variáveis. Também foi apresentado os valores médios dos anos de 2018-2020, período que foi considerado nos cálculos, uma vez que para projetos, o mais interessante é o emprego de dados mais recentes, em função das possíveis alterações da qualidade do curso d'água ao longo dos anos, dada a possível mudança do número de fontes de contribuição na bacia hidrográfica.

Tabela 4 – Valores médios das principais variáveis de caracterização de qualidade de água do Rio Grande no ponto de coleta da Estação Fluviométrica 61065100 – Itutinga-MG .

| Variável | pH | DQO | DBO | OD | ST | SS | PT | Namon | Nitrato | CT | CTerm |
|-----------------------|-------------|----------------------------------|-------------|-------------|---------------|---------------|-------------|-------------|---|-------------------|----------------|
| Unidades | - | -----(mg L^{-1})----- | | | | | | | -----($\text{NMP}/100 \text{ mL}$)----- | | |
| Dados de 1997-2020 | | | | | | | | | | | |
| Média (desvio padrão) | 6,94 (0,19) | 9,50 (6,36) | 2,00 (0,00) | 7,05 (0,78) | 36,50 (14,81) | 10,00 (11,31) | 0,03 (0,02) | 0,91 (0,12) | 0,17 (0,13) | 2,90E+3 (1,70E+3) | 5,00E+3 (0,00) |
| Número de dados | 71 | 35 | 92 | 94 | 94 | 54 | 94 | 90 | 94 | 54 | 80 |
| Dados de 2018-2020 | | | | | | | | | | | |
| Média (desvio Padrão) | 6,25 (0,2) | 14,00 (2,8) | 2,00 (0,0) | 6,90 (0,5) | 32,00 (6,5) | 6,50 (8,0) | 0,02 (0,0) | 0,13 (0,1) | 0,26 (0,2) | 2,42E+3 (7,25E+3) | -* |
| Número de dados | 9 | 7 | 7 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 0 |

Em que, OD é oxigênio dissolvido.

* - Não há dados relativos ao Coliformes Termotolerantes de 2018-2020, sendo adotado nos cálculos, a contagem de 1997-2020.

2.4. Carga poluidora lançada ao curso d'água

Para o cálculo da carga poluidora lançada ao curso d'água, foram considerados os valores típicos de esgoto sanitário encontrados em von Sperling (2017) (Tabela 3), além das contribuições das vazões recebidas de esgoto não tratado no rio, citado no item 2.1.2. ($1,2 \text{ L s}^{-1}$) e a vazão média das fossas negras comunitárias e das ETECs, obtido a partir do levantamento descrito no item 2.1.3. ($1,63 \text{ L s}^{-1}$).

A Carga lançada para cada variável foi calculada conforme Equação 4.

$$\text{carga lançada} = S_0 \times Q_e \quad (4)$$

Em que:

- carga lançada = carga lançada no rio para cada variável (kg d^{-1});
- S_0 = concentração de cada variável de acordo com os valores típicos encontrado por Von Sperling (2017) (Tabela 3) (mg L^{-1} , que corresponde à g m^{-3});
- Q_e = vazões recebidas de esgoto não tratado no rio e a vazão média das fossas negras comunitárias e das ETECs ($\text{m}^3 \text{ d}^{-1}$);

A contribuição per capita de cada variável foi considera de acordo com dados de von Sperling apresentandos na Tabela 5.

Tabela 5 – Faixas típicas de contribuição per capita de cada variável ($\text{g hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$).

| Variável | Contribuição per capita ($\text{g hab}^{-1} \text{ d}^{-1}$) | |
|----------|--|--------|
| | Faixa | Típica |
| DBO | 40-60 | 50 |
| DQO | 80-120 | 100 |
| SS | 35-70 | 60 |
| Namon | 3,5-6,0 | 4,5 |
| PT | 0,7-2,5 | 1 |
| CTerm | 10E+9-10E+12 | - |

Fonte: von Sperling (2017).

A partir do cálculo da carga lançada no curso d'água e a contribuição per capita (g

hab⁻¹ d⁻¹) de dados da Tabela 5, foi calculado o Equivalente Populacional do Despejo para cada variável, conforme Equação 5.

$$EP = \frac{\text{carga lançada}}{\text{contribuição per capita}} \quad (5)$$

Em que:

- EP = equivalente populacional (hab);
- carga lançada = carga lançada no rio para cada variável (kg d⁻¹);
- contribuição per capita = valores típicos de contribuição per capita de acordo com von Sperling (2017) (Tabela 5) (kg hab⁻¹ d⁻¹);

2.5. Requisitos necessários para disposição de esgoto no curso d'água

Visto que o curso d'água (Rio Grande) está localizado no estado de Minas Gerais, foram utilizados os critérios estabelecidos na Deliberação Normativa (DN) nº 1 de 2008 do COPAM/CERH.

Em relação ao Padrão para lançamento, deverá ser calculada a Eficiência mínima para lançamento para as variáveis DBO, DQO, SS e N_{amon}, conforme Equação 6.

$$E_{\min} = \frac{S_f - S_0}{S_f} \times 100 \quad (6)$$

Em que:

- E_{min} = eficiência mínima para lançamento (%);
- S_f = concentração de cada variável de acordo com os valores típicos encontrado por Von Sperling (2017) (Tabela 3) (mg L⁻¹);
- S₀ = valor máximo permissível consultado na DN COPAM/CERH 01/20008 (mg L⁻¹);

Para o cálculo da E_{minN_{amon}} foi utilizada a concentração S_f de Nitrogênio Total, visto que no esgoto bruto esse representa praticamente somente as parcelas de N_{org} e N_{amon} (NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl), e sabe-se que durante o tratamento o N_{org} será convertido em

N_{amon} . Essa condição ocorre, pois a fração de nitrogênio na forma oxidada (nitritos e nitratos) é praticamente desprezível (VON SPERLING, 2017).

Como na DN não há valores de eficiência mínima necessária para SS e N_{amon} , foram consideradas as eficiências necessárias para não ultrapassar as concentrações máximas de lançamento e também não alterar as condições estabelecidas na classe de enquadramento. Para atendimento da última condição, deve-se levar em consideração, as características do curso d'água (vazão referência e análise dos dados de qualidade da série histórica), e do despejo (vazão e valores medidos no esgoto). Assim, calcula-se a concentração no Ponto de Mistura, conforme Equação 7:

$$C_m = \frac{C_r \times Q_r + C_e \times Q_e}{Q_r + Q_e} \quad (7)$$

Rearranjando a Equação 7, deixa-se em função da concentração efluente que o esgoto deve possuir após o tratamento, de forma a não ultrapassar o valor permissível para a classe (C_m – concentração de mistura), tendo vazão tratada nas fossas negras e ETECs (Q_e), concentração C_r no curso d'água (à montante do despejo) e vazão do corpo receptor de Q_r .

$$C_e = \frac{[C_m \times (Q_r + Q_e)] - (C_r \times Q_r)}{Q_e} \quad (8)$$

Em que:

- C_m = concentração no ponto de mistura (onde há lançamento), de acordo com o valor máximo permissível para classe 2, disposto na DN COPAM/CERH 01/20008, supracitado na Tabela 5 (mg L^{-1});
- C_r = concentração no curso d'água, supracitado na Tabela 4 (mg L^{-1});
- Q_r = vazão do corpo receptor (Q de referência) (L s^{-1});
- C_e = concentração efluente (mg L^{-1});
- Q_e = vazão tratada nas fossas negras e ETECs (L s^{-1});

Posteriormente, foi calculada a $E_{\text{necessária}}$ conforme Equação 9.

$$E_{\text{necessária}} = \frac{S_f - C_e}{S_f} \times 100 \quad (9)$$

Em que:

- $E_{\text{necessária}}$ = eficiência necessária para não alteração da condição do curso d'água (%);
- S_f = concentração de cada variável de acordo com os valores típicos encontrado por Von Sperling (2017) (Tabela 3) (mg L^{-1});
- C_e = concentração de esgoto (mg L^{-1});

Caso os valores obtidos de C_e para as variáveis sejam maiores do que os valores de concentração de esgoto obtidos em literatura, a eficiência considerada no projeto foi a do padrão para o lançamento. Assim, em todos os casos será considerada a condição mais restritiva, o que garantiria o atendimento de ambos os requisitos (caso seja possível atendê-los).

Importante ressaltar que, para os cálculos, foi considerado o padrão de lançamento de nitrogênio amoniacal ainda que esse não seja válido para o despejo de esgotos sanitários, conforme estabelecido na DN COPAM 01/20008 (MINAS GERAIS, 2008).

Outra consideração feita no trabalho é a utilização de dados típicos de esgoto na literatura em S_f ao invés da utilização dos dados afluente à ETE Principal de Itutinga. Esse procedimento foi utilizado, pois o esgoto da entrada da estação de tratamento recebe contribuições de águas pluviais e de materiais das fossas sépticas e negras, condição que precisa ser revista. Assim, apresenta características diferentes daquelas do esgoto que seria coletado e tratado por soluções alternativas.

2.6. Critérios para escolha do sistema de tratamento

A escolha entre os processos de tratamento de esgoto se dá em razão das condições locais onde se pretende implantar o sistema de tratamento. Von Sperling (2017) propõe uma análise qualitativa das variáveis importantes para a seleção do sistema de tratamento, sendo elas: eficiência, confiabilidade, disposição do lodo, requisitos de área, impactos ambientais, custos de operação, custo de implantação, sustentabilidade e simplicidade.

Para o cálculo da área, custo e operação dos sistemas de tratamento, será utilizado o maior equivalente populacional calculado, considerando todas as variáveis analisadas, e

utilizando a Tabela 6 de referencia.

Tabela 6 – Sistemas de tratamento de esgoto, área demandada e custos de construção/implantação e operação/manutenção associados.

| Sistema | Área demandada (m ² hab ⁻¹) | Construção/implantação (R\$ hab ⁻¹) | Operação e manutenção (R\$ hab ⁻¹ ano ⁻¹) |
|-----------|---|--|---|
| TS+FA | 0,20-0,35 | 16-300 | 12-20 |
| UASB | 0,03-0,10 | 40-120 | 6-10 |
| LAN+LF | 1,50-3,00 | 90-140 | 5-8 |
| LF | 2,00-4,00 | 400-160 | 5-8 |
| LAF | 0,25-0,50 | 120-200 | 10-20 |
| LAMCS-LS | 0,20-0,40 | 120-200 | 10-20 |
| LAC | 0,12-0,25 | 240-300 | 20-40 |
| LAP | 0,12-0,25 | 200-270 | 20-40 |
| UASB+LAC | 0,08-0,20 | 120-250 | 15-30 |
| UASB+FBP | 0,10-0,20 | 150-250 | 12-18 |
| UASB+BFAS | 0,05-0,15 | 120-250 | 15-30 |
| SAC | 1,0-5,0 | 100-200 | 12-18 |

Em que, TS refere-se a Tanque Séptico, FA a Filtro Anaeróbio, LAN a Lagoas Anaeróbias, LF a Lagoas Facultativas, LAF a Lagoa Aerada Facultativa, LAMC a Lagoa Aerada de Mistura Completa, LS a Lagoa de Sedimentação, LAC a Lodos Ativados Convencional, LAP a Lodos Ativados de Aeração Prolongada, BFAS a Biofiltros Aerados Submersos, FBP a Filtro Biológico Percolador, SAC a Sistemas Alagados Construídos (wetlands construídos).

Fonte: von Sperling (2017).

Von Sperling (2017) cita ainda, as eficiências de remoção para os esgotos domésticos associados a esses sistemas de tratamento, conforme pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 – Sistemas de tratamento e eficiências típicas associadas considerando os parâmetros para esgotos domésticos.

| Eficiência típica de remoção para esgotos domésticos | | | | | | |
|--|---------|---------|--------|--------|--------|--------------------|
| Sistema | DBO (%) | DQO (%) | SS (%) | NT (%) | PT (%) | Colif. (unid. Log) |
| UASB | 60-75 | 55-70 | 65-80 | <60 | <35 | 1 |
| LAN + LF | 75-85 | 65-80 | 70-80 | <60 | <35 | 1-2 |
| LF | 75-85 | 65-80 | 70-80 | <60 | <35 | 1-2 |
| LAF | 75-85 | 65-80 | 70-80 | <30 | <35 | 1-2 |
| LAMC-LS | 75-85 | 65-80 | 80-87 | <30 | <35 | 1-2 |
| LAC | 85-93 | 80-90 | 87-93 | <60 | <35 | 1-2 |
| LAP | 90-97 | 83-93 | 87-93 | <60 | <35 | 1-2 |
| UASB + LAC | 83-93 | 75-88 | 87-93 | <60 | <35 | 1-2 |
| UASB + BFAS | 83-93 | 75-88 | 87-93 | <60 | <35 | 1-2 |
| UASB + FBP | 80-93 | 73-88 | 87-93 | <60 | <35 | 1-2 |
| SAC | 80-90 | 75-85 | 87-93 | <60 | <35 | 3-4 |

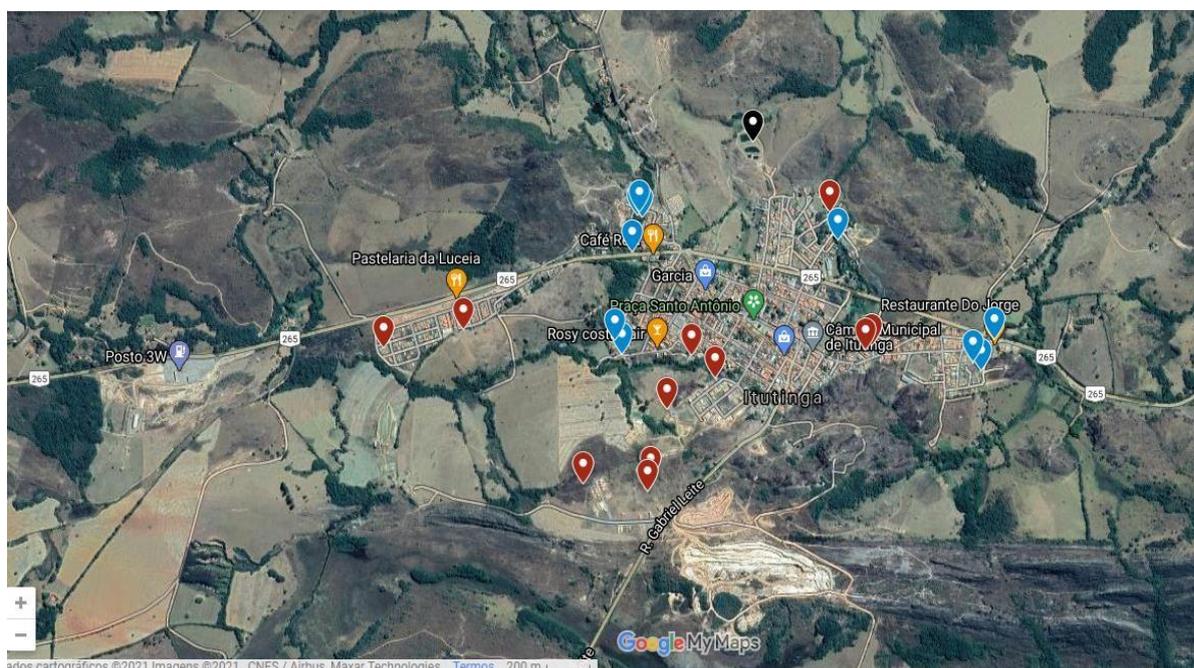
Fonte: von Sperling (2017).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Diagnóstico do tratamento de esgotos de Itutinga

Após o levantamento realizado sobre as unidades de tratamento e a localização, pontos foram demarcados no *Google Maps*, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Localizações da ETE principal, ETECs e fossas negras comunitárias presentes no município de Itutinga-MG.



Legenda: Marcações na cor vermelha correspondem às 11 ETECs; na cor preta a ETE principal e na cor azul as 11 fossas negras comunitárias.

Fonte: Do Autor (2021).

Devido à topografia do município, nem todo esgoto é passível de ser encaminhado por gravidade até a ETE principal sem que haja o bombeamento do mesmo. Por essa razão, somente o esgoto gerado no bairro central é canalizado e encaminhado até a ETE, criando um problema em relação ao tratamento dos demais bairros. A solução então encontrada pelo município foi a construção das ETECs e fossas negras comunitárias, que podem não representar uma solução ambientalmente adequada para o tratamento do esgoto, em função da baixa capacidade de depuração das águas residuárias.

De acordo com Faustino (2007), as fossas negras são uma das principais fontes de contaminação das águas subterrâneas, pela ausência de revestimento e de critério de aplicação, implicando em infiltração/percolação de águas residuárias contendo diversos poluentes e organismos patogênicos. Como consequência, há problemas ambientais, com contaminação por nitrato, por exemplo, e sociais em regiões com identificação da presença de fossas negras (ARRUDA; LIMA; SCALIZE, 2016; MARQUES et al., 2019; MARIOSA et al., 2020).

Além disso, há acúmulo de sólidos e do material orgânico na superfície do solo, havendo redução da capacidade de drenagem, podendo haver transbordamento e aumento do

risco de contato e contaminação da população. Por outro lado, essa condição também pode estar relacionado à problemas na concepção das fossas negras, fossas rudimentares ou fossas absorventes, sobretudo em relação ao atendimento de um grande contingente de moradores (FIGUEIREDO et al., 2019).

Outro problema, dessa vez relacionada às ETECs, é a falta de manutenção periódica, havendo apenas a sucção do esgoto transbordante das fossas sépticas. De acordo com a NBR 7.229 (ABNT, 1992), as fossas sépticas são dimensionadas para limpeza periódica de 1 a 5 anos. Como a limpeza das estruturas sanitárias tem sido feita diariamente, observa-se que há problemas no na operação das ETECs. Parte do problema está relacionado à contribuição de águas de chuva no sistema de tratamento.

Devido ao crescimento populacional, tem-se notado o aumento do número de ligações na rede coletora de esgoto, e em virtude de não ser empregado o sistema separador absoluto de águas pluviais e esgoto (concepção adotada no Brasil) no município, pode haver aumento considerável da vazão em períodos chuvosos (BARROS et al., 1995). Em uma avaliação da influência da chuva na rede de esgoto na Região Metropolitana de São Paulo, os autores Reda e Melo (2005), demonstram que em um dia chuvoso o pico de vazão chega a ser mais que o dobro da contribuição do período seco em uma bacia urbana.

Como solução paliativa a esse problema, é realizada constantemente, a sucção das fossas negras comunitárias e das fossas sépticas das ETECs vazantes, encaminhando o esgoto até a ETE principal, constituindo uma codisposição no sistema de lagoas. Se por um lado, esse procedimento reduz o problema nas ETECs, por outro lado, implica em prejuízo à operação da ETE principal, havendo sobrecarga na operação das lagoas. Consequentemente, pode resultar em diminuição da eficiência de tratamento, condição que leva a poluição aos cursos hídricos, uma vez que a estação não foi dimensionada para essa finalidade.

Mesmas observações foram relatadas na avaliação feita por Resende (2017), na antiga ETE do município, e no trabalho desenvolvido por Haddad (2013), que avaliou a codisposição de resíduos de fossas e tanque sépticos em sistema de tratamento de esgoto composto por lagoas anaeróbias, facultativas e de maturação. Os autores reportaram eficiências de remoção inferiores aos comumente encontradas para as unidades instaladas e o não atendimento da legislação.

Outro problema detectado nas ETECs é a inversão da posição entre fossas sépticas e filtros anaeróbios na linha de tratamento, sendo que a colocação do último como primeira unidade pode implicar em colmatação precoce do reator. Além disso, diminui a importância

das fossas sépticas que têm papel de decantador-digestor (JORDÃO; PESSOA, 2011), devendo, portanto, receber a contribuição de sólidos suspensos oriundos do esgoto bruto.

O diagnóstico da situação do saneamento no município está apresentado nas Tabelas 8 e 9, com levantamento do número de residências que contribuem para cada um dos sistemas de tratamento descritos, vazões de contribuição e volumes das fossas negras comunitárias.

Tabela 8 – Localização, volume das fossas negras que recebem contribuição de algumas das localidades e número de casas e estabelecimentos comerciais atendidos pelas fossas negras, ETE principal e ETECs nos bairros do município de Itutinga-MG.

| Localização | Volume das fossas negras (m³) | Número de casas e estabelecimentos atendidos |
|--|---|---|
| Bairro 111 | | |
| Fossa Negra 1 e 2 (interligam) | 120 | 47 casas 1 Restaurante |
| Fossa Negra 3 | 32 | 21 casas |
| Fossa Negra 4 - Rua João Antônio Silva | 36 | 18 casas |
| Bairro Nossa Senhora do Rosário | | |
| Fossa Negra 5 - Rua Crispim Andrade Leite | 10 | 9 casas 1 Quadra poliesportiva 1 Lanchonete |
| Fossa Negra 6 - Rua Cristóvão Antônio da Silva | 36 | 25 casas |
| ETE Compacta 11 | - | 7 casas |
| Bairro Vale das Águas | | |
| ETE Compacta 10 | - | 62 casas 1 Igreja |
| Bairro Vale da Ribeira | | |
| ETE Compacta 9 | - | 25 casas 1 Escola |
| Bairro Jardim Bela Vista | | |
| Fossa Negra 7 - Rua Sebastião Vieira Guimarães | 36 | 23 casas 1 Local de eventos |
| Fossa Negra 8 - Rua Luiz Gonzaga Nascimento | 36 | 59 casas 2 Restaurantes 2 Oficinas |

Tabela 8 – Localização, volume das fossas negras que recebem contribuição de algumas das localidades e número de casas e estabelecimentos comerciais atendidos pelas fossas negras, ETE principal e ETEC nos bairros do município de Itutinga-MG (continuação)

| Localização | Volume das fossas negras (m³) | Número de casas e estabelecimentos atendidos |
|--|---|---|
| ETE Compacta 8 - Rua José Batista | - | 164 casas 1 Escola 1 Oficina |
| Bairro São Gabriel | | |
| Fossa Negra 9 – Rua Otaviano Teodoro Leite | 32 | 35 Casas 1 Consultório Odontológico 1 Oficina 1 Pousada |
| Fossa Negra 10 – Rua Jânio Quadros | 32 | 36 Casas 1 Quadra Poliesportiva |
| Fossa Negra 11 – Rua Conceição Aureliano Filho | 32 | 13 Casas |
| Bairro Centro | | |
| ETE Compacta 7 | 60 | 1 Hospital (UBS) |
| ETE Compacta 6 | 60 | 1 Hospital (PSF) |
| ETE Principal | - | 388 casas 62 Estabelecimentos comerciais 3 Consultórios odontológicos 1 Posto de combustível 3 Pousadas 1 Escola 5 Igrejas 1 Fábrica |

Tabela 8 – Localização, volume das fossas negras que recebem contribuição de algumas das localidades e número de casas e estabelecimentos comerciais atendidos pelas fossas negras, ETE principal e ETEC nos bairros do município de Itutinga-MG (continuação).

| Localização | Volume | |
|--------------------------|--|---|
| | das fossas negras (m³) | Número de casas e estabelecimentos atendidos |
| Bairro Jhon Pool | | |
| ETE Compacta 5 | - | 18 casas 13 estabelecimentos comerciais |
| ETE Compacta 4 | - | 8 casas |
| Bairro Ponte Alta | | |
| ETE Compacta 1 | - | 3 casas |
| ETE Compacta 2 | - | 5 casas |
| ETE Compacta 3 | - | 5 casas |

Fonte: Do Autor (2021).

A partir do levantamento realizado foi calculado o número de contribuintes e as vazões média, máxima e mínima dessas unidades utilizando as Equações 1, 2 e 3. Os resultados obtidos estão supracitados na Tabela 8 abaixo.

Tabela 9 – Número de contribuintes e vazões média, máxima e mínima das unidades de tratamento dos bairros de Itutinga-MG.

| Bairro | Unidade de Tratamento | Número de contribuintes | $Q_{\text{méd}} (\text{m}^3 \text{d}^{-1})$ | $Q_{\text{máx}} (\text{m}^3 \text{d}^{-1})$ | $Q_{\text{mín}} (\text{m}^3 \text{d}^{-1})$ |
|--------------------------|-----------------------|-------------------------|---|---|---|
| 111 | Fossa Negra 1 e 2 | 118 | 10,81 | 19,46 | 5,40 |
| | (interligam) | 20 | 0,40 | 0,72 | 0,20 |
| | TOTAL | - | 11,21 | 20,18 | 5,60 |
| | Fossa Negra 3 | 53 | 4,83 | 8,69 | 2,42 |
| | Fossa Negra 4 | 45 | 4,14 | 7,45 | 2,07 |
| Nossa Senhora do Rosário | Fossa Negra 5 | 23 | 2,07 | 3,73 | 1,04 |
| | | 4 | 0,37 | 0,66 | 0,19 |
| | TOTAL | - | 2,44 | 4,39 | 1,23 |
| | Fossa Negra 6 | 63 | 5,75 | 10,35 | 2,88 |
| | ETE Compacta 11 | 18 | 1,61 | 2,90 | 0,81 |
| Vale das Águas | ETE Compacta 10 | 155 | 14,51 | 26,11 | 7,26 |
| Vale da Ribeira | ETE Compacta 9 | 63 | 5,75 | 10,35 | 2,88 |
| | | 20 | 0,80 | 1,44 | 0,40 |
| | TOTAL | - | 6,55 | 11,79 | 3,28 |
| Jardim Bela Vista | Fossa Negra 7 | 58 | 5,29 | 9,52 | 2,64 |
| | | 148 | 13,57 | 24,43 | 6,78 |
| | Fossa Negra 8 | 40 | 1,60 | 2,88 | 0,80 |
| | | 5 | 0,56 | 1,01 | 0,28 |
| | TOTAL | - | 15,73 | 28,32 | 7,86 |
| | | 410 | 37,72 | 67,9 | 18,86 |
| | ETE Compacta 8 | 30 | 1,20 | 2,16 | 0,60 |
| | | 3 | 0,17 | 0,30 | 0,09 |
| TOTAL | - | 39,09 | 70,36 | 19,55 | |

Tabela 9 – Número de contribuintes e vazões média, máxima e mínima das unidades de tratamento dos bairros de Itutinga-MG (continuação).

| Bairro | Unidade de Tratamento | Número de contribuintes | $Q_{\text{méd}} (\text{m}^3 \text{d}^{-1})$ | $Q_{\text{máx}} (\text{m}^3 \text{d}^{-1})$ | $Q_{\text{mín}} (\text{m}^3 \text{d}^{-1})$ |
|-------------|-----------------------|-------------------------|---|---|---|
| São Gabriel | | 88 | 8,05 | 14,49 | 4,02 |
| | Fossa Negra 9 | 3 | 0,17 | 0,30 | 0,09 |
| | | 3 | 0,24 | 0,43 | 0,12 |
| | TOTAL | - | 8,46 | 15,22 | 4,23 |
| | Fossa Negra 10 | 90 | 8,28 | 14,9 | 4,14 |
| | Fossa Negra 11 | 33 | 2,99 | 5,38 | 1,49 |
| Centro | ETE Compacta 7 | 10 | 0,40 | 0,72 | 0,20 |
| | ETE Compacta 6 | 10 | 0,40 | 0,72 | 0,20 |
| | | 970 | 97,00 | 174,6 | 48,50 |
| | | 124 | 4,96 | 8,93 | 2,48 |
| | ETE Principal | 9 | 0,72 | 1,30 | 0,36 |
| | | 20 | 0,80 | 1,44 | 0,40 |
| | | 10 | 0,56 | 1,01 | 0,28 |
| | TOTAL | - | 104,04 | 187,28 | 52,02 |
| Jhon Pool | ETE Compacta 5 | 45 | 4,14 | 7,45 | 2,07 |
| | | 6 | 0,24 | 0,43 | 0,12 |
| | TOTAL | - | 4,38 | 7,88 | 2,19 |
| | ETE Compacta 4 | 20 | 1,84 | 3,31 | 0,92 |
| Ponte Alta | ETE Compacta 3 | 8 | 0,69 | 1,24 | 0,34 |
| | ETE Compacta 2 | 13 | 1,15 | 2,07 | 0,58 |
| | ETE Compacta 1 | 13 | 1,15 | 2,07 | 0,58 |

Fonte: Do Autor (2021).

A fim de saber a contribuição total nessas unidades de tratamento foi realizado o somatório das vazões média, máxima e mínima. Nas fossas negras a vazão média foi de $69,12 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ ($0,80 \text{ L s}^{-1}$), tendo vazão mínima de $34,56 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ e vazão máxima de $124,40 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$; enquanto nas ETECs, obteve-se as vazões média, máxima e mínima de $71,77$ ($0,83 \text{ L s}^{-1}$), $129,17$ e $35,91 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$, respectivamente. Assim, $1,63 \text{ L s}^{-1}$ ou $140,98 \text{ m}^3 \text{d}^{-1}$ do esgoto de Itutinga são tratados fora da ETE principal, e serão foco do trabalho.

3.2. Avaliação da qualidade de água do Rio Grande e eficiências necessárias para disposição do esgoto sanitário

Os parâmetros definidos e as eficiências necessárias para atendimento da deliberação estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Eficiências necessárias para ser permissivo o lançamento de esgoto com as características da Tabela 3 do Rio Grande, considerando a Deliberação Normativa nº 1 de 2008 do COPAM/CERH e os cálculos realizados a seguir.

| Variável | Padrão para lançamento | | Classe de enquadramento do curso d'água (Classe 2) | | Eficiência considerada no projeto (%) ^a |
|----------|--------------------------|---------------------------------------|--|---------------------------|--|
| | Valor máximo permissível | Eficiência mínima para lançamento (%) | Valor máximo permissível | Eficiência necessária (%) | |
| DBO | 60 mg L ⁻¹ | 70 | 5 mg L ⁻¹ | ^c | 82 ^e |
| DQO | 180 mg L ⁻¹ | 65 | - | | 71 ^e |
| SS | 100 mg L ⁻¹ | 69 ^a | 100 mg L ⁻¹ | ^c | 69 |
| Namon | 20 mg L ⁻¹ | 58 ^a | 3,7 mg L ⁻¹ ^b | ^c | 58 |
| PT | - | - | 0,1 mg L ⁻¹ | ^c | - |
| Cterm | - | - | 10 ³ NMP/100 mL | ^d | |

^a - Valores calculados com base na concentração máxima permissível;

^b - Para pH < 7,5;

^c - Eficiências negativas;

^d - O valor no curso d'água já é superior ao limite para a classe 2;

^e - Foi considerada a condição mais restritiva na definição da eficiência, que é a concentração máxima.

Analisando os valores médios das principais variáveis de caracterização de qualidade de água do Rio Grande obtidos no ponto de coleta da Estação Fluviométrica de Itutinga (Tabela 4), nota-se que a variável Coliformes Termotolerantes já está fora do padrão preconizado pela DN COPAM/CERH 01/2008 para águas classificadas como classe 2, conforme pode ser observado na Tabela 10. Assim, com o tratamento de esgoto não é possível alcançar a Classe 2 para as referidas variáveis, considerando o pós-lançamento e a simulação da mistura no corpo receptor. Torna-se importante, portanto, proporcionar um adequado tratamento para as demais variáveis e que haja fiscalização para aumento da eficiência das

ETEs e a fiscalização das fontes de lançamento de esgoto não tratado à montante do ponto de avaliação.

Com base nessas condições, considerou-se uma eficiência mínima de 82% para DBO; 71% para DQO; 69% para SS; e 58% para nitrogênio amoniacal, enquanto para as demais variáveis não é possível alcançar a não alteração do curso d'água (coliformes termotolerantes) ou não é necessário ter eficiência, uma vez que foi de quase 100% (caso do P).

3.3. Características do esgoto

Na Tabela 11 estão apresentadas as características do esgoto de Itutinga, em comparação às características típicas do esgoto sanitário, considerando os valores médios das faixas obtidas por Jordão e Pessoa (2011), von Sperling (2017) e Matos e Matos (2017) (Tabela 3). Também estão apresentadas as características do esgoto sanitário dos Estados Unidos, de acordo com Lager (1977), considerando a concentração média do compilado feito nos municípios do país que utilizam do sistema unitário; a concentração de DBO obtida em estudo realizado por Thomann (1972) em uma rede de esgotos combinados da cidade de Northampton, na Inglaterra; e a concentração de DBO obtida em campanhas de pesquisa realizadas nos Estados Unidos, na Europa e na Austrália por Ellis (1985).

Tabela 11 – Características do esgoto de Itutinga-MG, do esgoto brasileiro e de países que utilizam do sistema unitário.

| Variáveis | Unidade | EB Itutinga | Jordão e Pessoa (2011) | von Sperling (2017) | Matos e Matos (2017) | Lager (1977) | Thomann (1972) | Ellis (1985) |
|-----------------------|--------------------|-------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|--------------|-------------------|--------------|
| DBO | mg L ⁻¹ | 408 | 250 | 325 | 210 | 115 | 78 | 132 |
| DQO | mg L ⁻¹ | 1003 | 500 | 625 | 585 | 375 | - | - |
| Sólidos Sedimentáveis | mL L ⁻¹ | 4,7 | 12,5 | 15 | 12,5 | - | - | - |
| <i>E. Coli</i> | NMP/100mL | 2,75E+07 | 1E+06 | 1E+07 | - | - | - | - |

Em que: EB é esgoto bruto.

Analisando os dados da Tabela 11, verifica-se que de fato, quando há mistura de água pluvial no esgoto, ocorre redução das concentrações das variáveis, conforme observado nos trabalhos de Lager (1977), Thomann (1972) e Ellis (1985). No entanto, conforme discutido por Field e Fan (1981), essa condição nem sempre é observado na prática. Isso porque no sistema unitário, pode-se gerar tanto águas residuárias altamente diluídos até efluentes com grandes concentrações de poluentes, pelo fato de as águas pluviais poderem diluir os contaminantes e/ou carrear sólidos em suspensão, elevando a sua presença no esgoto (TOURINHO, 2001).

Em relação às características do esgoto da ETE Principal, que é uma mistura do esgoto gerada nas residências, água pluvial e mais a contribuição do material retido nas ETECs e fossas negras comunitárias, observa-se que esse se apresenta mais concentrado do que esgoto sanitário típico de sistemas de esgotamento sanitário do tipo separador absoluto. Assim, verifica-se a importância de encontrar soluções para tratamento do esgoto das localidades não atendidas pela ETE principal, de forma a não sobrecarregá-la.

A partir dos valores típicos das características dos esgotos sanitários brutos da Tabela 3, segundo von Sperling (2017), além da vazão de esgotos que são tratados nas ETECs e nas fossas negras comunitárias, foi calculada a carga a ser tratada na ETE alternativa (proposta por esse trabalho) bem como o equivalente populacional. A partir dos resultados obtidos construiu-se a Tabela 12.

Tabela 12 – Carga afluyente às fossas negras e ETECs e o Equivalente Populacional, calculadas a partir da concentração e contribuição *per capita* do esgoto sanitário bruto.

| Variável | Concentração (mg L ⁻¹)* | Contribuição per capita (kg hab ⁻¹ d ⁻¹)* | Carga lançada (kg d ⁻¹) | Equivalente Populacional (hab) |
|------------------------|--|---|--|-----------------------------------|
| DBO | 325 | 0,05 | 79,51 | 1.590,29 |
| DQO | 625 | 0,1 | 152,91 | 1.529,13 |
| NT | 47,5 | 0,008 | 11,62 | 1.452,67 |
| N _{amoniacal} | 27,5 | 0,0045 | 6,73 | 1.495,14 |
| PT | 9,5 | 0,001 | 2,32 | 2.324,27 |
| ST | 1.025 | 0,18 | 250,78 | 1.393,20 |
| SS | 325 | 0,06 | 79,51 | 1.325,24 |

* - Fonte: von Sperling (2017)

Analisando os resultados da Tabela 12, nota-se que o maior valor de Equivalente Populacional obtido é para o PT (2.324 hab), valor esse que será considerado na estimativa dos custos e na área demandada, baseando-se na Tabela 6.

3.4. Avaliação de alternativas de tratamento de esgotos

O tratamento de esgotos é dividido didaticamente em níveis de tratamento, sendo: Tratamento Preliminar, Primário, Secundário e Terciário (VON SPERLING, 2017). Sendo que a primeira etapa visa a remoção de sólidos grosseiros e areia, com a finalidade de evitar a obstrução das tubulações e equipamentos, além de reatores a jusante. As principais estruturas que constituem essa etapa são as grades, desarenador e medidor de vazão (JORDÃO; PESSOA, 2011).

Já o tratamento primário destina-se à remoção de sólidos em suspensão sedimentáveis e sólidos flutuantes, sendo uma parcela de 25 a 35% da matéria orgânica removida nesta etapa. Assim, a remoção ocorre por processos simples, como a sedimentação e filtração, podendo ser realizado em decantadores primários, fossas sépticas, filtros anaeróbios, filtros orgânicos e flotores (JORDÃO; PESSOA, 2011).

A seguir, o esgoto passa pelo tratamento secundário, no qual ocorrem processos biológicos, com a finalidade de remover a matéria orgânica e, eventualmente, os nutrientes (N e P) (VON SPERLING, 2017). Os principais sistemas de tratamento de esgotos em nível secundário consistem de lagoas de estabilização, disposição no solo, sistemas anaeróbios, sistemas alagados construídos, lodos ativados e filtros aeróbios (GONÇALVES, 2001).

Em algumas estações de tratamento de esgotos do país, existe o tratamento terciário que visa propiciar a remoção de poluentes específicos (usualmente tóxicos ou compostos não biodegradáveis) ou ainda, a remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário (VON SPERLING, 2017), podendo acontecer por meio de lagoas de maturação, pela precipitação, adsorção, coagulação ou rampas de escoamento (METCALF; EDDY, 2003).

Segundo von Sperling (2013), dentre as configurações de tratamento de esgotos, podem ser citadas as seguintes: UASB, Lagoas Anaeróbias seguidas por Lagoas Facultativas, Lagoas Facultativas, Lagoa Aerada Facultativa, Lagoa Aerada de Mistura Completa seguida por Lagoas de Sedimentação, Lodos Ativados Convencional, Lodos Ativados de Aeração Prolongada, UASB seguido por Filtro Biológico Percolador, UASB seguido por Biofiltro

Aerado Submerso e Sistemas Alagados Construídos. A seguir, essas unidades serão discutidas como alternativas à substituição das fossas negras e às ETECs em Itutinga.

3.4.1. UASB

No reator anaeróbio de manta de lodo e escoamento ascendente (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reator-UASB*), o esgoto entra pelo fundo, sofre ação de microrganismos anaeróbios, que degradam a matéria orgânica, crescem e se reproduzem e formam o leito de lodo. Neste processo, também é gerado biogás, que é removido na parte superior do separador trifásico, enquanto o líquido tratado é recolhido nas canaletas localizadas na parte superior do reator (VERSIANI; MACIEL, 2005; CHERNICHARO et al., 2015).

Na Tabela 13, estão apresentados os parâmetros considerados no dimensionamento e a área e volume obtidos do reator UASB.

Tabela 13 – Parâmetros de projeto considerados no projeto do reator UASB e área e volume obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|---------------------------------|--------------------------------|--------------|---|
| Temperatura do mês mais frio (T) | INMET | °C | - | 16,9 |
| Vazão de esgoto (Q) | - | m ³ d ⁻¹ | - | 140,98 |
| Tempo de detenção hidráulica (TDH) | Chernicharo (2007) p/ T < 20 °C | h | 6-16 | 8 |
| Altura (h) | Chernicharo (2007) | m | - | 4,5 |
| Volume calculado (V) | Autor (2021) | m ³ | - | 46,9 |
| Área calculada | Autor (2021) | m ² | - | 10,4 |
| Eficiência DBO (Ef) | von Sperling (2017) | % | 60-75 | 67,8 |
| Eficiências demais variáveis (Ef) | von Sperling (2017) | % | - | 62,5 de DQO, <60 de N, <35 de P e 72,5 de SS. |
| Atendimento das | Autor (2021) | | | Não |

eficiências de projeto?

Apesar de o UASB apresentar um desempenho eficiente na remoção de matéria orgânica e de sólidos suspensos, seu efluente, geralmente, apresenta DBO e DQO residuais acima dos limites estabelecidos pela legislação ambiental, bem como, apresenta baixa eficiência na remoção de organismos patogênicos e de nutrientes. Dessa forma, o UASB tem sido apontado como uma boa alternativa de baixo custo para o tratamento de águas residuárias, mas invariavelmente, necessita de um tratamento posterior de forma a complementar a depuração do efluente (CHERNICHARO, 2007; VON SPERLING, 2017). Como pontos positivos do pós-tratamento cita-se ainda a redução do volume total das unidades de tratamento e a redução da quantidade de lodo gerado.

3.4.2. Lagoa Anaeróbia (LAN) seguida por Lagoa Facultativa (LF)

Nesta concepção de tratamento, há a presença de lagoas anaeróbias, mais profundas e que recebem maiores taxas de aplicação, e lagoas facultativas, mais rasas e que demandam maiores áreas (VON SPERLING, 1997).

Tabela 14 – Parâmetros de projeto considerados no projeto da Lagoa Anaeróbia e tempo de detenção hidráulica, taxa de aplicação volumétrica, volume e área obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|--------------|--------------------------------|--------------|--------------------------|
| Temperatura do mês mais frio (T) | INMET | °C | - | 16,9 |
| Vazão de esgoto (Q) | - | m ³ d ⁻¹ | - | 140,98 |
| Tempo de detenção hidráulica calculado (TDH) | Autor (2021) | d | - | 3 |

Tabela 14 – Parâmetros de projeto considerados no projeto da Lagoa Anaeróbia e tempo de detenção hidráulica, taxa de aplicação volumétrica, volume e área obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|---------------------|--|--------------|--------------------------|
| Taxa de aplicação volumétrica calculada (L_v) | Autor (2021) | kgDBO ₅ m ⁻³ d ⁻¹ | - | 0,24 |
| Carga de DBO afluente | Tabela 9 | kg d ⁻¹ | - | 79,51 |
| Profundidade (h) | von Sperling (2002) | m | 3-5 | 4,0 |
| Volume calculado (V) | Autor (2021) | m ³ | - | 331,29 |
| Área calculada (A) | Autor (2021) | m ² | - | 82,82 |
| Eficiência DBO (Ef) | von Sperling (2017) | % | 60-75 | 68 |

A taxa de aplicação volumétrica (L_v) foi calculada conforme Equação 10.

$$L_v = 0,02 \times T - 0,10 \quad (10)$$

Com a obtenção da taxa de aplicação volumétrica, foi determinado o volume requerido para a lagoa anaeróbia através da Equação 11.

$$V = \frac{L}{L_v} \quad (11)$$

Em que:

- V = volume requerido para lagoa anaeróbia (m^3);
- L = carga de DBO afluente ($kg\ d^{-1}$);
- L_v = taxa de aplicação superficial ($kgDBO_5\ m^{-3}d^{-1}$);

A eficiência de remoção de DBO nas lagoas anaeróbias é baixa, necessitando de uma unidade posterior de tratamento. Por essa razão, é comumente utilizado do sistema australiano de lagoas, que consiste no tratamento em lagoas anaeróbias seguida por facultativa, elevando a eficiência de remoção de DBO.

Para complementar a remoção, foi feito o dimensionamento da lagoa facultativa, com os parâmetros utilizados e calculados apresentados na Tabela 15. Foi considerada uma eficiência de 68% de remoção de DBO na lagoa anaeróbia, conforme eficiências típicas apresentado em von Sperling (2017).

Tabela 15 – Parâmetros de projeto considerados no projeto da Lagoa Facultativa e taxa de aplicação superficial, carga de DBO afluente, volume e área obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|---------------------|----------------------------|--------------|--------------------------|
| Temperatura do mês mais frio (T) | INMET | °C | - | 16,9 |
| Vazão de esgoto (Q) | - | $m^3\ d^{-1}$ | - | 140,98 |
| Tempo de detenção hidráulica (TDH) | von Sperling (2002) | d | 15-45 | 15 |
| Taxa de aplicação superficial (Ls) | von Sperling (2002) | $kgDBO_5\ ha^{-1}\ d^{-1}$ | 120-240 | 180 |
| Carga de DBO afluente calculada | Autor (2021) | $kg\ d^{-1}$ | - | 25,44 |

Tabela 15 – Parâmetros de projeto considerados no projeto da Lagoa Facultativa e taxa de aplicação superficial, carga de DBO afluente, volume e área obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|--|---------------------|----------------|--------------|---|
| Volume calculado (V) | Autor (2021) | m ³ | - | 2.114,7 |
| Profundidade (h) | von Sperling (2002) | m | 1,5-2,0 | 1,5 |
| Área calculada (A) | Autor (2021) | m ² | - | 1.413 |
| Eficiência DBO para LAN + LF (Ef) | von Sperling (2017) | % | 75-85 | 80 |
| Eficiências demais variáveis para LAN + LF (Ef) | von Sperling (2017) | % | - | 72,5 de DQO, <60 de N, <35 de P e 75 de SS. |
| Atendimento das eficiências de projeto? | Autor (2021) | | | Sim |

A área requerida para a lagoa facultativa foi calculada conforme Equação 12.

$$A = \frac{L}{L_s} \quad (12)$$

Em que:

- A = área requerida para lagoa facultativa (ha);
- L = carga de DBO afluente (kg d⁻¹);
- L_s = taxa de aplicação superficial (kgDBO₅ ha⁻¹ d⁻¹);

A soma das áreas das lagoas anaeróbia e facultativa é elevada, sendo neste caso, de 1.495,82 m². Embora seja menor do que a demanda para lagoa facultativa como etapa única, ainda sim, este é um ponto que a coloca em desvantagem em relação às demais unidades de tratamento. Outra desvantagem relacionada ao sistema é a possibilidade de maus odores na lagoa anaeróbia e a necessidade de um afastamento razoável de residências. No entanto, como fatores positivos cita-se a simplicidade operacional e de manutenção; a satisfatória resistência a variações de carga; e a remoção de lodo ser necessária apenas após períodos superiores há 20 anos (VON SPERLING, 2014).

3.4.3. Lagoas Facultativas (LF)

As LF por si só apresentam uma boa eficiência de remoção de DBO, no entanto, sem a presença de uma lagoa anaeróbia anterior requer uma maior área.

Tabela 16 – Parâmetros de projeto considerados no projeto da Lagoa Facultativa e volume e área obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|---------------------|---|--------------|--------------------------|
| Vazão de esgoto (Q) | - | m ³ d ⁻¹ | - | 140,98 |
| Tempo de detenção hidráulica (TDH) | von Sperling (2002) | d | 15-45 | 15 |
| Taxa de aplicação superficial (Ls) | von Sperling (2002) | kgDBO ₅ ha ⁻¹ d ⁻¹ | 120-240 | 180 |
| Carga de DBO afluyente | Tabela 9 | kg d ⁻¹ | - | 79,51 |
| Profundidade (h) | von Sperling (2002) | m | 1,5-2,0 | 1,5 |
| Volume calculado (V) | Autor (2021) | m ³ | - | 2.114,7 |

Tabela 16 – Parâmetros de projeto considerados no projeto da Lagoa Facultativa e volume e área obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|--|---------------------|----------------|--------------|---|
| Eficiência (Ef) | von Sperling (2017) | % | 75-85 | 80 |
| Área calculada (A) | Autor (2021) | m ² | - | 4.417 |
| Eficiências demais variáveis (Ef) | von Sperling (2017) | % | - | 72,5 de DQO, <60 de N, <35 de P e 75 de SS. |
| Atendimento das eficiências de projeto? | Autor (2021) | | | Sim |

Apesar de ser o sistema mais simples de lagoas de estabilização, possuindo simplicidade de operação e manutenção, e a alta eficiência do sistema equiparando com aos demais tratamentos primários, a lagoa facultativa requer uma elevada demanda de área (VON SPERLING, 2014). Como discutido, a soma das áreas das lagoas anaeróbia e facultativa do item anterior foram inferiores à demanda de área de se ter apenas a lagoa facultativa.

3.4.4. Lagoa Aerada Facultativa (LAF)

A principal diferença da lagoa aerada facultativa com relação à lagoa facultativa convencional é quanto à forma de suprimento de oxigênio. Enquanto na lagoa facultativa o oxigênio é advindo da fotossíntese, no caso da lagoa aerada facultativa o oxigênio é obtido principalmente por meio de aeradores (VON SPERLING, 1997). Portanto, é necessário calcular a quantidade de oxigênio a ser fornecido pelos aeradores para a estabilização aeróbia da matéria orgânica.

A lagoa é denominada facultativa pelo fato do nível de energia introduzido pelos aeradores ser suficiente apenas para a oxigenação, mas não para manter os sólidos (bactérias e sólidos em suspensão do esgoto bruto) dispersos na massa líquida. Desta forma, os sólidos tendem a sedimentar e constituir a camada de lodo de fundo, a ser decomposta anaerobiamente (VON SPERLING, 1997). Assim, há manutenção de zonas aeróbias, na parte superior, e anaeróbia no fundo do tanque.

Tabela 17 – Parâmetros de projeto considerados no projeto da Lagoa Aerada Facultativa e requisito de oxigênio, taxa de transferência de oxigênio, volume e área obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|------------------------|----------------------------------|--------------|--------------------------|
| Vazão de esgoto (Q) | - | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | - | 140,98 |
| Tempo de detenção hidráulica (TDH) | von Sperling (2002) | d | 5-10 | 8 |
| Concentração de DBO | von Sperling (2017) | mg L^{-1} | - | 325 |
| Concentração de NT | von Sperling (2017) | mg L^{-1} | - | 47,5 |
| Concentração de NTK | Padrão para lançamento | mg L^{-1} | - | 20 |
| Profundidade (h) | von Sperling (2002) | m | 2,5-4,5 | 3,5 |
| Coefficiente (a) para demanda carbonácea | - | $\text{gO}_2 \text{gDBO}_5^{-1}$ | 0,8-1,2 | 1,0 |
| Coefficiente (a) para demanda nitrogenada | - | $\text{gO}_2 \text{gN}^{-1}$ | 3,8-4,3 | 4 |
| Requisito de Oxigênio calculado para demanda carbonácea (RO) | Autor (2021) | $\text{kgO}_2 \text{d}^{-1}$ | - | 37,57 |

Tabela 17 – Parâmetros de projeto considerados no projeto da Lagoa Aerada Facultativa e requisito de oxigênio, taxa de transferência de oxigênio, volume e área obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|-----------------------|----------------------------------|--------------|--------------------------|
| Requisito de Oxigênio calculado para demanda nitrogenada (RO) | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 15,51 |
| Requisito de Oxigênio Total calculado | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 53,08 |
| Taxa de transferência de oxigênio padrão calculado (TTOpadrão) | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 85,23 |
| Fator de influência na transferência de oxigênio (β) | Metcalf & Eddy (1991) | - | 0,7-0,98 | 0,95 |
| Altitude média de Itutinga | Itutinga (2021) | m | - | 969 |
| Concentração a 20°C (Cs) | - | mg L ⁻¹ | - | 9,2 |
| Concentração de OD a ser mantida no líquido (C_L) | - | mg L ⁻¹ | - | 1,5 |

Tabela 17 – Parâmetros de projeto considerados no projeto da Lagoa Aerada Facultativa e requisito de oxigênio, taxa de transferência de oxigênio, volume e área obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|--|-----------------------|----------------|--------------|---|
| Fator de influência na transferência de oxigênio (a) | Metcalf & Eddy (1991) | - | 0,6-1,2 | 0,9 |
| θ | - | - | - | 1,024 |
| Temperatura do líquido (T) | HIDROWEB | °C | - | 20,05 |
| Fator de correção da altitude calculado (f_H) | Autor (2021) | m | - | 0,90 |
| Volume calculado (V) | Autor (2021) | m ³ | - | 1.127,84 |
| Área calculada (A) | Autor (2021) | m ² | - | 322,24 |
| Eficiência DBO (Ef) | von Sperling (2017) | % | 75-85 | 80 |
| Eficiências demais variáveis (Ef) | von Sperling (2017) | % | - | 72,5 de DQO, <60 de N, <35 de P e 75 de SS. |
| Atendimento das eficiências de projeto? | Autor (2021) | | | Sim |

O Requisito de Oxigênio (RO) foi calculado conforme Equação 13.

$$RO = \frac{a \times Q \times (S_0 - S)}{1000} \quad (13)$$

Em que:

- RO = Requisito de Oxigênio (kg d^{-1});
- a = coeficiente;
- Q = vazão tratada nas fossas negras e ETECs ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$);
- S_0 = concentração de DBO afluente, segundo von Sperling (2017) (mg L^{-1});
- S = concentração de DBO efluente (mg L^{-1});

Foi calculado também o RO para a demanda nitrogenada, conforme Equação 14.

$$RO = \frac{a \times Q \times [N - \text{NTK}]}{1000} \quad (14)$$

Em que:

- RO = requisito de oxigênio (kg d^{-1});
- a = coeficiente ($\text{gO}_2 \text{kg N}^{-1}$);
- Q = vazão tratada nas fossas negras e ETECs ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$);
- N = concentração de Nitrogênio Total (mg L^{-1});
- NTK = concentração de Nitrogênio Total Kjeldahl (mg L^{-1});

Por fim, foi calculado o $TTO_{\text{padrão}}$, conforme Equação 15.

$$TTO_{\text{padrão}} = \frac{TTO_{\text{campo}}}{\frac{\beta \times f_H \times C_S - C_L}{C_{S20^\circ\text{C}}} \times a \times \theta^{T-20}} \quad (15)$$

Em que:

- $TTO_{\text{padrão}}$ = taxa de transferência de oxigênio padrão ($\text{kgO}_2 \text{d}^{-1}$);
- TTO_{campo} = taxa de transferência de oxigênio de campo ($\text{kgO}_2 \text{d}^{-1}$);

- β = fator de influência na transferência de oxigênio;
- f_H = fator de correção da altitude (m);
- C_S = concentração a 20°C (mg L^{-1});
- C_L = concentração de OD a ser mantida no líquido (mg L^{-1});
- $C_{S20^\circ\text{C}}$ = concentração a 20°C e na altitude 0 (mg L^{-1});
- a = fator de influência na transferência de oxigênio;
- $\theta = 1,024$;
- T = temperatura do líquido ($^\circ\text{C}$);

A demanda de área para a lagoa aerada facultativa é de 322,24 m², sendo, portanto, inferior a das lagoas anaeróbia e facultativa e facultativa como única etapa. Além do mais, apresentam satisfatória resistência a variações de carga e reduzidas possibilidades de maus odores. No entanto, necessita do consumo de energia, devido à introdução de aeradores, aumentando, conseqüentemente, os custos (VON SPERLING, 2014).

3.4.5. Lagoa Aerada de Mistura Completa (LAMC) seguida por Lagoa de Decantação (LD)

As lagoas aeradas de mistura completa são essencialmente aeróbias. Os aeradores servem, não só para garantir a oxigenação do meio, mas também para manter os sólidos em suspensão (biomassa) dispersos no meio líquido. Assim sendo, é necessária a implementação de lagoas de decantação, visando remover os sólidos suspensos das lagoas (VON SPERLING, 1997).

Para o dimensionamento da lagoa de decantação devem ser previstos volumes destinados à clarificação e ao armazenamento e digestão do lodo. Segundo von Sperling (1997), para atendimento dessas condições é preciso ter profundidade superior a 3,0 m (1,5 m para clarificação e 1,5 m para armazenamento do lodo) e TDH entre 1,0 e 2,0 d, de forma a permitir a sedimentação do material e ao mesmo tempo evitar a proliferação de algas. Os parâmetros de dimensionamento estão apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Parâmetros de projeto considerados no projeto da Lagoa Aerada de Mistura Completa seguida por Lagoa de Decantação e tempo de detenção hidráulica, requisito de oxigênio, taxa de transferência de oxigênio, volume e área obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|--|---------------------|----------------------------------|--------------|--------------------------|
| Vazão de esgoto (Q) | - | m ³ d ⁻¹ | - | 140,98 |
| Tempo de detenção hidráulica para LAMC (TDH) | von Sperling (1997) | d | 2,0-4,0 | 3,0 |
| Tempo de detenção hidráulica para LD (TDH) | von Sperling (1997) | d | 1,0-2,0 | 1,0 |
| Profundidade LAMC (h) | von Sperling (1997) | m | 2,5-4,5 | 3,5 |
| Profundidade LD (h) | von Sperling (1997) | m | - | 4,5 |
| Requisito de Oxigênio calculado para demanda carbonácea (RO) | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 37,57 |
| Requisito de Oxigênio calculado para demanda nitrogenada (RO) | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 15,51 |

Tabela 18 – Parâmetros de projeto considerados no projeto da Lagoa Aerada de Mistura Completa seguida por Lagoa de Decantação e tempo de detenção hidráulica, requisito de oxigênio, taxa de transferência de oxigênio, volume e área obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|---------------------|----------------------------------|--------------|--------------------------|
| Requisito de Oxigênio Total calculado | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 53,08 |
| Taxa de transferência de oxigênio padrão calculado (TTOpadrão) | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 85,23 |
| Volume calculado LAMC (V) | Autor (2021) | m ³ | - | 422,94 |
| Volume de clarificação calculado (V) | Autor (2021) | m ³ | - | 140,98 |
| Área calculada LAMC (A) | Autor (2021) | m ² | - | 120,84 |
| Área calculada LD (A) | Autor (2021) | m ² | - | 31,33 |
| Área total (A) | Autor (2021) | m ² | - | 152,17 |
| Eficiência DBO para LAMC + LD (Ef) | von Sperling (2017) | % | 75-85 | 80 |

Tabela 18 – Parâmetros de projeto considerados no projeto da Lagoa Aerada de Mistura Completa seguida por Lagoa de Decantação e tempo de detenção hidráulica, requisito de oxigênio, taxa de transferência de oxigênio, volume e área obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|---------------------|----------------|--------------|---|
| Eficiências demais variáveis para LAMC + LD (Ef) | von Sperling (2017) | % | - | 72,5 de DQO, <60 de N, <35 de P e 83,5 de SS. |
| Atendimento das eficiências de projeto? | Autor (2021) | | | Sim |

O RO para a demanda carbonácea e para a demanda nitrogenada, assim como a TTOPadrão e a TTOcampo, foram calculadas conforme as Equações 13, 14 e 15 (Item 3.4.4).

A área demandada para a lagoa aerada de mistura completa seguida por lagoa de decantação é de 152,17 m², sendo os menores requisitos de todos os sistemas de lagoas. Como ponto negativo, cita-se a maior geração de lodo, sendo necessário realizar a remoção com maior frequência (2 a 5 anos) (VON SPERLING, 2014).

3.4.6. Lodo Ativado Convencional (LAC)

Fazem parte do sistema de lodos ativados, o tanque de aeração (reator) e os tanques de decantação (decantadores primário e secundário). No reator ocorrem as reações bioquímicas de remoção da matéria orgânica e no decantador secundário a sedimentação dos sólidos, sendo que parte dos sólidos sedimentados no fundo do decantador são recirculados para o reator, aumentando a concentração de biomassa ativa (VON SPERLING, 2002).

Para esse reator, existem diversas variantes do sistema, sendo a mais comum de Lodo Ativado Convencional (LAC), que se caracteriza pela presença de decantador primário, e menores tempos de detenção hidráulica (TDH) e de retenção celular (θ_c) em comparação com outras configurações. Nas Tabela 19, 20 e 21, estão apresentados os dados utilizados para dimensionamento, respectivamente, do decantador primário, tanque de aeração e decantador

secundário.

Tabela 19 – Parâmetros de projeto considerados no projeto de Decantador primário e volume e área obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|-----------------------|--|--------------|--------------------------|
| Vazão de esgoto (Q) | - | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | - | 140,98 |
| Taxa de aplicação hidráulica (TAH) | Metcalf e Eddy (2003) | $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | 24-34 | 29 |
| Altura útil (h) | von Sperling (2002) | m^2 | - | 4 |
| Volume útil calculado (V) | Autor (2021) | m^3 | - | 19,44 |
| Área superficial calculada (A) | Autor (2021) | m^2 | - | 4,86 |
| Diâmetro (D) | Autor (2021) | M | - | 2,49 |
| Eficiência DBO (Ef) | von Sperling (2017) | % | - | 32,5 |

Para o dimensionamento do Tanque de Aeração foi escolhido o sistema de aeração mecânica, sendo adotados aeradores de eixo vertical, axial, de alta rotação.

Tabela 20 – Parâmetros de projeto considerados no projeto de Tanque de Aeração e volume, requisito de oxigênio, taxa de transferência de oxigênio e área obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|---------------------|--------------------------------------|--------------|--------------------------|
| Vazão de esgoto (Q) | - | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | - | 140,98 |
| Volume calculado (V) | Autor (2021) | m^3 | - | 13,68 |
| Tempo de detenção hidráulica (TDH) | - | H | 6-8 | 7 |
| Área calculada (A) | Autor (2021) | m^2 | - | 3,42 |
| Coefficiente de produção celular (Y) | - | gSSV gDBO_5^{-1} | 0,4-0,8 | 0,6 |
| Idade do lodo (θ_c) | - | d^{-1} | 4-10 | 7 |
| Concentração de DBO (S_0) | von Sperling (2017) | mg L^{-1} | - | 325 |
| Concentração de SSV (X_v) | - | mg L^{-1} | 2.500-4.000 | 2.500 |
| Coefficiente de respiração endógena (K_d) | - | d^{-1} | 0,06-0,1 | 0,53 |
| Fração biodegradável (f_b) | - | $\frac{\text{mgSSb}}{\text{mg SSV}}$ | - | 0,57 |

Tabela 20 – Parâmetros de projeto considerados no projeto de Tanque de Aeração e volume, requisito de oxigênio, taxa de transferencia de oxigenio e área obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|--------------|---|--------------|--------------------------|
| Potencia de aeração | - | W hab ⁻¹ | 2,5-4,5 | - |
| Consumo energético | - | kWh hab ⁻¹ ano ⁻¹ | 18-26 | - |
| Profundidade aeradores (h) | - | M | 3,5-4,5 | 4 |
| Requisito de Oxigênio calculado para demanda carbonácea (RO) | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 25,36 |
| Requisito de Oxigênio calculado para demanda nitrogenada (RO) | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 15,51 |
| Requisito de Oxigênio Total calculado | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 40,87 |
| Taxa de transferencia de oxigenio padrão calculado (TTOpadrão) | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 65,55 |

O volume do tanque de aeração foi calculado conforme Equação 16.

$$V = \frac{Y \times \theta_c \times Q \times (S_0 - S)}{X_v \times (1 + K_d \times f_b \times \theta_c)} \quad (16)$$

Em que:

- V = volume do tanque de aeração (m^3);
- Y = coeficiente de produção celular ($gSSV \ gDBO_5^{-1}$);
- θ_c = idade do lodo (d^{-1});
- Q = vazão tratada nas fossas negras e ETECs ($m^3 \ d^{-1}$);
- S_0 = concentração de DBO afluente ($mg \ L^{-1}$);
- S = concentração de DBO efluente ($mg \ L^{-1}$);
- X_v = concentração de SSV no tanque de aeração ($mg \ L^{-1}$);
- K_d = coeficiente de respiração endógena (d^{-1}); f_b = fração biodegradável ($mgSSb \ mg \ SSV^{-1}$);

O RO para a demanda carbonácea e para a demanda nitrogenada, assim como a TTOpadrão e a TTOcampo, foram calculadas conforme as Equações 13, 14 e 15 (Item 3.4.4).

O dimensionamento do decantador secundário deverá ser realizado considerando o critério hidráulico e o critério de aplicação de sólidos.

Tabela 21 – Parâmetros de projeto considerados no projeto de Decantador secundário e vazão, área a diâmetro obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|------------------|--|--------------|--------------------------|
| Vazão de esgoto (Q) | - | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | - | 140,98 |
| Vazão máxima diária calculada ($Q_{\text{máx}}$ diária) | Autor (2021) | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | - | 169,18 |
| Vazão de recirculação calculada (Q_r) | Autor (2021) | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | - | 112,78 |
| Coefficiente de máxima vazão diária (K_1) | - | - | - | 1,2 |
| Constante (c) | - | - | - | 0,8 |
| Taxa de aplicação Hidráulica para vazão média (TAH) | NBR 12209 (2011) | $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | 16-32 | 23 |
| Taxa de aplicação Hidráulica para vazão máxima (TAH) | NBR 12209 (2011) | $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | 40-48 | 44 |
| Taxa de Aplicação de Sólidos para vazão média (TAS) | NBR 12209 (2011) | $\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | 100-144 | 122 |

Tabela 21 – Parâmetros de projeto considerados no projeto de Decantador secundário e vazão, área a diâmetro obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|--------------------------|------------------------------------|--------------|--------------------------|
| Taxa de Aplicação de Sólidos para vazão máxima (TAS) | NBR 12209 (2011) | kg m ⁻² d ⁻¹ | - | 240 |
| Área – Critério Hidráulico calculado (vazão média) | Autor (2021) | M | - | 6,13 |
| Área – Critério Hidráulico calculado (vazão máxima) | Autor (2021) | m | - | 3,20 |
| Área - critério de aplicação de sólidos calculada (vazão média) | Autor (2021) | M | - | 6,24 |
| Área - critério de aplicação de sólidos calculada (vazão máxima) | Autor (2021) | M | - | 3,85 |
| Diametro calculado (D) | Autor (2021) | M | - | 2,82 |
| Profundidade | NBR 12209 (2011) p/ D<12 | M | - | 3,3 |

Tabela 21 – Parâmetros de projeto considerados no projeto de Decantador secundário e vazão, área a diâmetro obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|---------------------|--------------------|--------------|---|
| Concentração de ST | von Sperling (2017) | mg L ⁻¹ | - | 3.000 |
| Eficiência DBO global (Ef) | von Sperling (2017) | % | 85-95 | 90 |
| Eficiências demais variáveis global (Ef) | von Sperling (2017) | % | - | 85 de DQO, <60 de N, <35 de P e 90 de SS. |
| Atendimento das eficiências de projeto? | Autor (2021) | | | Sim |

No critério hidráulico para o cálculo da área é considerada a Taxa de Aplicação Hidráulica (TAH) em função da vazão média e da vazão máxima.

Já no critério hidráulico, para o cálculo da área é considerada a Taxa de Aplicação de Sólidos (TAS). A área foi calculada conforme Equação 17.

$$A = \frac{(Q+Q_r) \times ST}{TAS} \quad (17)$$

Em que:

- A = área do decantador secundário (m²);
- Q = vazão tratada nas fossas negras e ETECs (m³ d⁻¹);
- Q_r = vazão de recirculação (m³ d⁻¹);
- ST = concentração de sólidos totais segundo von Sperling (2017) (mg L⁻¹);
- TAS = taxa de aplicação superficial (kg m⁻²d⁻¹);

Analisando os dois critérios, o maior valor de área obtido foi de 6,24 m². De acordo

com a NBR 12209 (2011) para diâmetros menores que 12,0 m, recomenda-se uma profundidade de 3,3 m.

Apesar de o lodo ativado convencional apresentar pontos positivos como a elevada eficiência na remoção de DBO, a possibilidade de remoção biológica de N e P, os baixos requisitos de área, e as reduzidas possibilidades de maus odores, insetos e vermes, em uma cidade de pequeno porte se torna inviável, devido aos elevados custos de implantação e operação e consumo de energia, a necessidade de operação sofisticada, o elevado índice de mecanização, e a necessidade do tratamento completo do lodo e da sua disposição final (PHILIPPI, 2005; VON SPERLING, 2014; CORNELLI ET AL., 2014).

3.4.7. Lodo Ativado de Aeração Prolongada (LAP)

O Lodo Ativado de Aeração Prolongada (LAP) é uma das variantes do sistema de lodos ativados. Segundo von Sperling (2002), nesse sistema a quantidade de biomassa, o volume e o TDH são maiores que no LAC. Assim, a estabilização da biomassa ocorre no próprio tanque de aeração, portanto, como não há a necessidade de estabilizar o lodo excedente, não requer a presença de decantador primário.

Tabela 22 – Parâmetros de projeto considerados no projeto de Tanque de Aeração e requisito de oxigênio, taxa de transferência de oxigênio, volume e área obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|--------------|--------------------------------|--------------|--------------------------|
| Vazão de esgoto (Q) | - | m ³ d ⁻¹ | - | 140,98 |
| Volume calculado (V) | Autor (2021) | m ³ | - | 117,48 |
| Profundidade aeradores (h) | - | M | 3,5-4,5 | 4,0 |
| Tempo de detenção hidráulica (TDH) | - | H | 16-24 | 20 |
| Área calculada (A) | Autor (2021) | m ² | - | 29,37 |

Tabela 22 – Parâmetros de projeto considerados no projeto de Tanque de Aeração e requisito de oxigênio, taxa de transferência de oxigênio, volume e área obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|--------------|---|--------------|--------------------------|
| Potencia instalada | - | W hab ⁻¹ | 3,5-5,5 | - |
| Consumo energético | - | kWh hab ⁻¹ ano ⁻¹ | 20-35 | - |
| Requisito de Oxigênio calculado para demanda carbonácea (RO) | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 37,57 |
| Requisito de Oxigênio calculado para demanda nitrogenada (RO) | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 15,51 |
| Requisito de Oxigênio Total calculado | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 53,08 |
| Taxa de transferencia de oxigenio padrão calculado (TTOpadrão) | Autor (2021) | kgO ₂ d ⁻¹ | - | 85,23 |

O RO para a demanda carbonácea e para a demanda nitrogenada, a TTOpadrão e a TTOcampo, foram calculadas conforme as Equações 13, 14 e 15 respectivamente (Item 3.4.4)

e o volume conforme a Equação 16 (Item 3.4.6).

Assim como para o LAC, o dimensionamento do decantador secundário deverá ser realizado considerando o critério hidráulico e o critério de aplicação de sólidos.

Tabela 23 – Parâmetros de projeto considerados no projeto de Decantador secundário e vazão, área, volume e diâmetro obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|------------------|--|--------------|--------------------------|
| Vazão de esgoto (Q) | - | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | - | 140,98 |
| Vazão máxima diária calculada ($Q_{\text{máx}}$ diária) | Autor (2021) | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | - | 169,18 |
| Vazão de recirculação calculada (Q_r) | Autor (2021) | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | - | 112,78 |
| Taxa de aplicação Hidráulica para vazão média (TAH) | NBR 12209 (2011) | $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | 8-16 | 12 |
| Taxa de aplicação Hidráulica para vazão máxima (TAH) | NBR 12209 (2011) | $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | 24-32 | 28 |
| Taxa de Aplicação de Sólidos para vazão média (TAS) | NBR 12209 (2011) | $\text{kg m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | 24-120 | 72 |

Tabela 23 – Parâmetros de projeto considerados no projeto de Decantador secundário e vazão, área, volume e diâmetro obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|--------------------------|------------------------------------|--------------|--------------------------|
| Taxa de Aplicação de Sólidos para vazão máxima (TAS) | NBR 12209 (2011) | kg m ⁻² d ⁻¹ | - | 170 |
| Área – Critério Hidráulico calculada (vazão média) | Autor (2021) | m ² | - | 11,75 |
| Área – Critério Hidráulico calculada (vazão máxima) | Autor (2021) | m ² | - | 6,04 |
| Área - critério de aplicação de sólidos calculada (vazão média) | Autor (2021) | m ² | - | 10,57 |
| Área - critério de aplicação de sólidos calculada (vazão máxima) | Autor (2021) | m ² | - | 4,98 |
| Diâmetro calculado (D) | Autor (2021) | m | - | 3,87 |
| Profundidade | NBR 12209 (2011) p/ D<12 | m | - | 3,3 |
| Volume calculado (V) | Autor (2021) | m ³ | - | 38,78 |

Tabela 23 – Parâmetros de projeto considerados no projeto de Decantador secundário e vazão, área, volume e diâmetro obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|---------------------|--------------------|--------------|---|
| Concentração de ST | von Sperling (2017) | mg L ⁻¹ | - | 3.000 |
| Eficiência DBO global (Ef) | von Sperling (2017) | % | 90-97 | 93,5 |
| Eficiências demais variáveis global (Ef) | von Sperling (2017) | % | - | 88 de DQO, <60 de N, <35 de P e 90 de SS. |
| Atendimento das eficiências de projeto? | Autor (2021) | | | Sim |

Analisando os dois critérios, o maior valor de área obtido foi de 11,75 m². Apesar de o lodo ativado de aeração prolongada demandar uma área maior do que o lodo ativado convencional é um sistema mais simples conceitualmente. Além do mais, há uma menor geração de lodo, uma vez que este é estabilizado no próprio reator, não requerendo etapa adicional de tratamento (digestão) dos sólidos suspensos (VON SPERLING, 2014).

3.4.8. UASB seguido por Filtro Biológico Percolador (FBP)

Foi considerado o FBP de alta taxa, uma vez que possui como vantagens, por exemplo, a maior resistência às variações de carga que filtros de baixa carga, em razão da recirculação da água residuária, garantindo uma nova oportunidade de remoção da matéria orgânica e por possuir menor requisito de área, uma vez que a relação alimento microrganismo é alta (SILVA; GONÇALVES, 2004).

Na Tabela 24, estão apresentados os parâmetros considerados no dimensionamento do FBP, considerando a remoção prévia do UASB (Item 3.4.1).

Tabela 24 – Parâmetros de projeto considerados no projeto do Filtro Biológico Percolador e vazão, taxa de aplicação hidráulica, eficiência de remoção, concentração de DBO removida, concentração de DBO afluente, volume, área superficial e velocidade obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|--|-------------------------|--|--------------|--------------------------|
| Vazão de esgoto (Q) | - | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | - | 140,98 |
| Vazão máxima diária calculada ($Q_{\text{maxdiária}}$) | Autor (2021) | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | - | 169,18 |
| Vazão máxima horária calculada ($Q_{\text{maxhorária}}$) | Autor (2021) | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | - | 211,47 |
| Coefficiente de máxima vazão diária (K_1) | - | - | - | 1,2 |
| Coefficiente de máxima vazão horária (K_2) | - | - | - | 1,5 |
| Brita | - | - | - | 4 ou 5 |
| Diametro brita | - | cm | - | 5 e 10 |
| Área superficial específica (ASE) brita | - | $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ | - | 55-80 |
| Porosidade (ϵ) | - | - | - | 0,55-0,66 |
| Altura meio suporte | Gonçalves et al. (2001) | m | 2-3 | 3 |
| Carga Orgânica Volumétrica (COV) | - | $\text{kgDBO m}^{-3} \text{d}^{-1}$ | 0,5-1,0 | 0,6 |
| Taxa de Aplicação Hidráulica (TAH) | - | $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | 10-40 | - |
| Taxa de Aplicação Hidráulica calculada para vazão média (TAH) | Autor (2021) | $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | - | 14,20 |

Tabela 24 – Parâmetros de projeto considerados no projeto do Filtro Biológico Percolador e vazão, taxa de aplicação hidráulica, eficiência de remoção, concentração de DBO removida, concentração de DBO afluente, volume, área superficial e velocidade obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|--|------------------------|--|--------------|--------------------------|
| Taxa de Aplicação | | | | |
| Hidráulica calculada para vazão máxima diária (TAH) | Autor (2021) | $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | - | 17,04 |
| Taxa de Aplicação | | | | |
| Hidráulica calculada para vazão máxima horária (TAH) | Autor (2021) | $\text{m}^3 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | - | 21,30 |
| Altura | - | m | - | 2,5 |
| Eficiência de remoção de DBO no UASB | von Sperling (2017) | % | - | 67,8 |
| Eficiência de remoção calculada (E) | Autor (2021) | % | - | 77,3 |
| Fator de recirculação (F) | p/ 50% de recirculação | % | - | 1,36 |
| Concentração de DBO | | | | |
| removida calculada (S_{remov}) | Autor (2021) | mg L^{-1} | - | 81,65 |
| Concentração de DBO afluente calculada (S_0) | Autor (2021) | mg L^{-1} | - | 105,63 |
| Volume calculado (V) | Autor (2021) | m^3 | - | 24,82 |
| Área superficial calculada (A_s) | Autor (2021) | m^2 | - | 9,93 |
| Velocidade rotacional do distribuidor (n) | Autor (2021) | rpm | - | 0,032 |

Tabela 24 – Parâmetros de projeto considerados no projeto do Filtro Biológico Percolador e vazão, taxa de aplicação hidráulica, eficiência de remoção, concentração de DBO removida, concentração de DBO afluente, volume, área superficial e velocidade obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|--|--|--------------------------|--------------|--|
| Taxa de dosagem (TD) | Metcalf e Eddy (2003) para um COV de 0,8 gDBO ₅ m ⁻³ d ⁻¹ | mm rotação ⁻¹ | - | 152,4 |
| Número de braços do distribuidor (a) | Imhoff (1986) | - | 2, 4, ou 6 | 2 |
| Eficiência DBO para UASB + FBP (Ef) | von Sperling (2017) | % | 80-93 | 86,5 |
| Eficiências demais variáveis para UASB + FBP (Ef) | von Sperling (2017) | % | - | 80,5 de DQO, <60 de N, <35 de PT e 90 de SS. |
| Atendimento das eficiências de projeto? | Autor (2021) | | | Sim |

Em razão do meio suporte apresentar baixa porosidade e pequena área superficial específica (ASE) é um material mais pesado, logo, a altura do filtro não poderá ser muito elevada por questões estruturais. A escolha da brita como meio suporte se deve aos menores custos e a facilidade de aquisição (METCALF; EDDY, 2003).

O volume do filtro foi calculado, conforme Equação 18.

$$V = \frac{Q \times S_0}{COV} \quad (18)$$

Em que:

- V = volume do filtro (m^3);
- Q = vazão tratada nas fossas negras e ETECs ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$);
- S_0 = concentração de DBO afluente (g m^{-3});
- COV = carga orgânica volumétrica ($\text{kgDBO m}^{-3} \text{d}^{-1}$);

Ambos os valores obtidos nas taxas estão dentro do limite permissível, por isso, foi calculada a eficiência do sistema conforme Equação 19.

$$E = \frac{1}{1 + 0,433 \times \sqrt{\frac{\text{COV}}{F}}} \quad (19)$$

Em que:

- E = eficiência de remoção (%);
- COV = carga orgânica volumétrica ($\text{kgDBO m}^{-3} \text{d}^{-1}$);
- F = fator de recirculação;

A velocidade rotacional do distribuidor foi calculada conforme Equação 20.

$$n = \frac{q_s}{\text{TD} \times a} \quad (20)$$

Em que:

- N = velocidade rotacional do distribuidor (rpm);
- q_s = taxa de aplicação superficial (mm m^{-1});
- TD = taxa de dosagem por braço do distribuidor (mm rotação^{-1});
- a = número de braços do distribuidor;

Como pontos positivos do filtro biológico percolador de alta taxa, cita-se a elevada eficiência na remoção de DBO (embora ligeiramente inferior aos filtros de baixa carga), o fato de serem mais simples conceitualmente do que lodos ativados, a maior flexibilidade

operacional que filtros de baixa carga, a melhor resistência a variações de carga que filtros de baixa carga, e a reduzida possibilidade de maus odores. Enquanto pontos negativos cita-se a operação ligeiramente mais sofisticada do que os filtros de baixa carga, os elevados custos de implantação, a relativa dependência da temperatura do ar, a necessidade do tratamento completo do lodo e da sua disposição final, e a elevada perda de carga (VON SPERLING, 2014).

3.4.9. UASB seguido por Biofiltro Aerado Submerso (BFAS)

O reator BFAS é constituído de um tanque com aeração ascendente, preenchido com material suporte, capaz de permitir o crescimento do biofilme (GONÇALVES, 2005). Em seu interior há a coexistência de condições aeróbias, anóxicas e anaeróbias, sendo esta uma importante característica do sistema, que possibilita a remoção de nutrientes, principalmente o N, por meio do processo de nitrificação/desnitrificação (METCALF; EDDY, 2002).

Os biofiltros se diferenciam dos FBP pela introdução de oxigênio por meio de difusores, e ainda podem ser classificados como unidades de leito estruturado (preenchidos com materiais pedregulhosos ou plásticos) e granular (materiais finos como carvão ativado e areia) (JORDÃO; PESSOA, 2011). Na Tabela 25, estão apresentados os dados do dimensionamento de um BFAS de leito estruturado, considerando a remoção prévia do UASB (Item 3.4.1).

Tabela 25 – Parâmetros de projeto considerados no projeto do Biofiltro Aerado Submerso e concentração de DBO afluente, volume, área e vazão de ar obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|--------------|---------------------------------------|-------|-------------------|
| Vazão de esgoto (Q) | - | m ³ d ⁻¹ | - | 140,98 |
| Carga Orgânica Volumétrica (COV) | - | kgDBO m ⁻³ d ⁻¹ | ≤1,8 | 1,0 |
| Concentração de DBO afluente | Autor (2021) | mg L ⁻¹ | - | 105,63 |

calculado (S_0)

Tabela 25 – Parâmetros de projeto considerados no projeto do Biofiltro Aerado Submerso e concentração de DBO afluente, volume, área e vazão de ar obtidos no dimensionamento (continuação).

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|------------------------|--|--------------|---|
| Taxa de aeração | NBR 12209/2011 | Nm ³ de ar kgDBO aplicada ⁻¹ | ≥30 | 40 |
| Volume calculado (V) | Autor (2021) | m ³ | - | 14,89 |
| Superfície específica | NBR 12209/2011 | m ² m ⁻³ | ≤250 | - |
| Altura (h) | NBR 12209/2011 | m | ≥1,6 | 1,6 |
| Área calculada (A) | Autor (2021) | m ² | - | 9,31 |
| Vazão de ar calculada (Qar) | Autor (2021) | Nm ³ d ⁻¹ | - | 595,67 |
| Eficiência DBO para UASB + BFAS (Ef) | von Sperling (2017) | % | 83-93 | 88 |
| Eficiências demais variáveis para UASB + BFAS (Ef) | von Sperling (2017) | % | - | 80,5 de DQO, <60 de N, <35 de P e 90 de SS. |
| Atendimento das eficiências de projeto? | Autor (2021) | - | - | Sim |

O volume do filtro foi calculado conforme Equação 21.

$$V = \frac{Q \times S_0}{COV} \quad (21)$$

Em que:

- V = volume do filtro (m^3);
- Q = vazão tratada nas fossas negras e ETECs ($m^3 d^{-1}$);
- S_0 = concentração de DBO afluente no reator ($g m^{-3}$);

A vazão de ar necessária foi calculada conforme Equação 22.

$$Q_{ar} = taxa \times \frac{S_{0FBAS} \times Q}{1000 \text{ gDBO}_{aplicada} \text{ kgDBO}_{aplicada}^{-1}} \quad (22)$$

Em que:

- Q_{ar} = vazão de ar ($Nm^3 d^{-1}$);
- Taxa = taxa de ar aplicada ($Nm^3 \text{ de ar kgDBO}_{aplicada}^{-1}$);
- S_{0FBAS} = concentração afluente de DBO no filtro ($gDBO m^{-3}$);
- Q = vazão tratada nas fossas negras e ETECs ($m^3 d^{-1}$);

O biofiltro aerado submerso demanda um baixo requisito de área, assim como o filtro biológico percolador de alta carga. Além do mais, apresenta elevada eficiência na remoção de DBO, reduzidas possibilidades de maus odores, reduzida perda de carga, alta velocidade de sedimentação e por consequência maior clarificação do efluente, grande superfície para crescimento de microorganismos, e alta idade do lodo. Como pontos negativos cita-se a necessidade do tratamento completo do lodo, a operação ligeiramente sofisticada, o elevado consumo de energia, a baixa eficiência na remoção de coliformes, a necessidade de operação um pouco mais cuidadosa que os filtros percoladores, o difícil controle da espessura do biofilme, problemas de entupimento, e o longo tempo de partida (VON SPERLING, 2014; CORNELLI ET AL., 2014).

3.4.10. Sistemas Alagados Construídos (SAC)

Os Sistemas Alagados Construídos (SACs), também conhecidos como *Wetlands construídos*, são constituídos de sistemas impermeabilizados no fundo e nas laterais, com a presença de meio suporte e espécies vegetais, onde ocorre a filtração, adsorção, sedimentação, precipitação, absorção e degradação dos poluentes (MARQUES, 1999; WOOD, 1995; MATOS et al., 2008). Nesse reator, há, portanto, interação de plantas, meio suporte e microrganismos na depuração de águas residuárias. Segundo Sezerino et al. (2015), as unidades podem ser de escoamento superficial (SAC-ES), nas quais podem ser utilizadas plantas submersas ou flutuantes; ou de escoamento subsuperficial (com espécies emergentes), podendo ser de escoamento vertical (SAC-EV) ou horizontal (SAC-EHSS – horizontal subsuperficial) (KADLEC; KNIGHT, 1996).

A escolha da unidade vertical se deve pelo fato de demandar menor área e ter maior tempo de vida útil do que o SAC-EHSS, além de ter menor risco de exalação de odores, contaminação dos operadores e atração de vetores do que os SACs-ES (OLIJNYK, 2008). Assim, foi feito o dimensionamento com base nos dados na Tabela 26.

No SAC-EV, a aplicação do esgoto é feita de forma intermitente, ou seja, com períodos de aplicação e repouso, de forma em que há maior aeração do leito e grande retenção de sólidos na superfície (menor granulometria no topo da unidade). Assim, ao se interromper a aplicação do efluente, há degradação do material orgânico acumulado, reduzindo o risco de colmatação, e dado o maior potencial redox, propicia maior nitrificação, além de trocas gasosas (KADLEC; WALLACE, 2008).

Para o dimensionamento será utilizada uma espécie de macrófita enraizada com parte aérea emersa (helófitas), sendo escolhida a Taboa (*Typha latifolia*). A definição por essa planta, se deve pelo fato de que tem raízes em contato com o líquido em tratamento, além de ter a parte aérea acima do nível do leito, permitindo melhor desenvolvimento e remoção de poluentes. Além disso, é uma espécie adaptada e resistente a condições alagadas e com alta concentração de sais, e possui interesse comercial, podendo ser utilizada para artesanato, adubo verde e produção de álcool (BRIX, 1987; CONLEY et al., 1991; MATOS; MATOS, 2017).

Tabela 26 – Parâmetros de projeto considerados no projeto de Sistemas Alagados Construídos e área superficial e volume obtidos no dimensionamento.

| Fator | Fonte | Unidade | Faixa | Valor considerado |
|---|-------------------------|---|--------------|--|
| Vazão de esgoto (Q) | - | $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$ | - | 140,98 |
| Área superficial calculada (As) | Autor (2021) | m^2 | - | 1.403,93 |
| Concentração de N_{amoniaco} | von Sperling (2017) | mg L^{-1} | - | 27,5 |
| Concentração de DBO | von Sperling (2017) | mg L^{-1} | - | 325 |
| Taxa de Aeração na Superfície (Tas) | Sezerino, et al. (2015) | $\text{gO}_2 \text{m}^{-2} \text{d}^{-1}$ | - | 30 |
| Concentração de NTK | Padrão para lançamento | mg L^{-1} | - | 20 |
| Profundidade | Sezerino, et al. (2015) | m | - | 0,15 |
| Volume calculado (V) | Autor (2021) | m^3 | - | 210,59 |
| Eficiência DBO (Ef) | von Sperling (2017) | % | 80-90 | 85 |
| Eficiências demais variáveis (Ef) | von Sperling (2017) | % | - | 80 de DQO, <60 de N, <35 de PT e 90 de SS. |
| Atendimento das eficiências de projeto? | Autor (2021) | | | Sim |

A Área Superficial (As) do sistema foi calculada utilizando o método de Brix e Johansen de fornecimento de O_2 conforme Equação 23.

$$A_S = \frac{(4,3 \times N_{\text{amoniacal}} + \text{DBO}_{\text{rem}}) \times Q}{\text{TAS}} \quad (23)$$

Em que:

- A_S = área superficial do sistema (m^2);
- $N_{\text{amoniacal}}$ = concentração de nitrogênio na forma amoniacal, ou seja, $\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NH}_3$ (mg L^{-1});
- DBO_{rem} = Demanda Bioquímica de Oxigênio de 5 dias a 20°C , a ser removida;
- TAS = Taxa de Aeração na Superfície do sistema ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$ de O_2); Q = vazão tratada nas fossas negras e ETECs ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$);

A aplicação será feita em bateladas de 7 em 7 dias, com isso serão necessários dois tanques com A_S de $1403,93 \text{ m}^2$ cada, uma vez que serão consideradas duas células.

Como pontos negativos dos sistemas alagados construídos, cita-se a necessidade de grandes áreas para tratamento de grandes volumes quando comparados a filtros biológicos; o efluente líquido pode não apresentar um aspecto agradável; demandam longo tempo de detenção hidráulica; é afetado pelas condições climáticas; demandam tratamento prévio do esgoto; é susceptível a entupimentos (colmatação – principal problema operacional); apresenta necessidade de preenchimento de substrato filtrante, que constitui grande parte dos custos de construção; e o requerimento de manejo das macrófitas. No entanto, é indicado no tratamento de efluentes de pequenas comunidades, uma vez que apresentam vantagens como o baixo custo de implantação; a simplicidade de operação; o fato de ser autossustentável; a alta capacidade de remoção de matéria orgânica, sólidos, nutrientes e patógenos; a alta eficiência dos processos aeróbios; apresentam menores problemas quanto a colmatação do filtro; não há geração de lodo; pode gerar renda através da utilização da biomassa produzida; e a baixa produção de odores (ALMEIDA et al., 2007; MONTEIRO 2009; CALIJURI et al., 2009; ORMONDE, 2012; VON SPERLING, 2014).

3.5. Escolha do tratamento

Com base na Tabela 6 apresentada e a partir da área demandada, foram calculados os custos de construção/implantação e operação/manutenção associados aos sistemas de

tratamento, considerando o maior equivalente populacional obtido (2.324 hab) e as faixas superiores dos valores. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 27.

Tabela 27 – Sistemas de tratamento de esgoto e demandas de área e custos de construção/implantação e operação/manutenção associados, considerando o EP de 2.324 hab e os valores encontrados por von Sperling (2017).

| Sistema | Área demandada (m ²) | Custo construção (R\$) | Custo operação/manutenção anual (R\$) |
|-------------|-------------------------------------|---------------------------|---|
| UASB | 10,44 | 325.397,80 | 23.242,70 |
| LAN + LF | 1.495,82 | 268.112,40 | 18.594,16 |
| LF | 4.417,00 | 371.883,20 | 18.594,16 |
| LAF | 322,24 | 464.854,00 | 46.485,40 |
| LAMCS + LD | 152,17 | 464.854,00 | 46.485,40 |
| LAC | 13,42 | 697.281,00 | 92.970,80 |
| LAP | 41,12 | 627.552,90 | 92.970,80 |
| UASB + FBP | 20,37 | 581.067,50 | 41.836,86 |
| UASB + BFAS | 19,75 | 581.067,50 | 69.728,10 |
| SAC | 2.807,86 | 464.854,00 | 41.836,86 |

Fonte: Do Autor (2021).

Para a análise técnico-financeiro, dividiu-se a inferência sobre a configuração da ETE alternativa em itens:

a) Atendimento à legislação

Conforme discutido nos dimensionamentos realizados, apenas a configuração com reator UASB como etapa única não permitiu alcançar as eficiências de projeto, considerando os padrões para lançamento e a não alteração da condição do trecho do rio Grande. Assim, essa alternativa foi descartada.

Essa condição já era esperada, pois segundo Chernicharo et al. (2015), reatores anaeróbios requerem a presença de pós-tratamento caso a destinação seja a disposição em cursos d'água.

b) Custos

De acordo com a Tabela 24, os maiores custos de construção, manutenção e operação estão associados aos lodos ativados (LAC e LAP), em razão da maior demanda energética (para aeração e recirculação). O LAP apresenta um maior custo de construção, fato que pode ser justificado pelo maior volume do tanque de aeração (VON SPERLING, 2012). Assim, tratando-se um município com pequena disponibilidade de recursos financeiros, a adoção dessas configurações torna-se inviável.

Os menores custos encontrados foram nos sistemas de reator anaeróbio e nas lagoas de estabilização sem aeração, respectivamente, as configurações mais encontradas no estado de Minas Gerais e no Sudeste conforme identificado por Pereira (2018). Após esses reatores, os menores custos foram, nessa ordem, na construção de SACs e UASB + FBP, LAF e LAMC-LS. Os resultados foram semelhantes aos obtidos na avaliação de Oliveira (2018). O autor observou que sistemas descentralizados são mais econômicos em condições de áreas com menor custo do metro quadrado, comumente encontrada em pequenos municípios; enquanto reatores convencionais são mais adequados para adoção em cidades de maior porte.

c) Área demandada

A lagoa facultativa como única etapa é o sistema que apresenta a maior demanda por área, seguido dos SACs de escoamento vertical, lagoa anaeróbia + lagoa facultativa, enquanto o reator UASB e os lodos ativados são aqueles que requerem menor espaço físico. Os SACs apesar de exigirem estruturas maiores, possuem vantagens como simplicidade operacional e de manutenção; não requerer mão de obra especializada; tem baixa geração de lodo; tem nenhum ou baixo requisito energético; e possibilidade de aproveitamento da biomassa vegetal e algal para alimentação animal, artesanato, energia (KADLEC; WALLACE, 2009; LOPES et al., 2020). Essas condições são de interesse para um município de pequeno porte, que tem o saneamento gerido pela própria prefeitura. Porém, deve-se considerar o prévio conhecimento que servidores do município têm sobre a operação de sistema australiano de lagoas, o fato de que não exigem as maiores áreas e de que possuem os menores custos.

Então, com base nos custos, eficiência e área demandada, sugere-se que Itutinga faça a construção de uma nova estação de tratamento de esgotos, denominada aqui de ETE Alternativa, que seja constituída do sistema australiano (lagoa anaeróbia + lagoa facultativa) com área total de 1.495,82 m². Dessa forma, haveria atendimento da população que não tem o seu esgoto encaminhado para a ETE principal, além de aproveitar o conhecimento que os funcionários têm na operação das unidades já instaladas.

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que:

- O esgoto da entrada da ETE principal de Itutinga apresenta-se mais concentrado do que o efluente típico da literatura, em função da codisposição do material coletado nas fossas sépticas e negras;
- 28% das residências e estabelecimentos têm o seu esgoto encaminhado para fossas negras, 29% para ETEs compactas (fossas sépticas e sumidouros) e 43% para a ETE principal;
- Dentre as opções analisadas para implementação no município, em função dos menores custos e eficiências compatíveis com o padrão de lançamento, simplicidade de operação e manutenção, e conhecimento prévio do funcionamento da configuração lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa (sistema existente na ETE principal), sugere-se a adoção do sistema australiano em Itutinga.
- Devido ao fato de no município ser empregado o sistema unitário de esgotos, onde há a mistura de águas pluviais no esgoto sanitário, diferindo da concepção adotada no Brasil de sistema separador absoluto, faz-se necessário o estudo de uma Lei Municipal para que novas construções sejam projetadas para o sistema separador absoluto. Para tal é necessário à criação de uma nova rede separadora para as áreas em expansão, e que sejam tomadas medidas frequentes de fiscalização da prefeitura, como a exigência de atendimento da ligação de drenagem e esgoto atrelada à regularização do imóvel, por exemplo.

5. SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

- Devido ao relevo desfavorável em Itutinga faz-se necessário um estudo considerando a rede coletora do município, assim como uma análise detalhada em relação às áreas aptas para implementação da configuração escolhida. Nesse quesito deve-se levar em conta a necessidade de utilização de estações elevatórias para bombeamento do esgoto ou o encaminhamento por gravidade;
- Outro ponto a ser aperfeiçoado no trabalho é a utilização de uma matriz de ponderação para a tomada de decisão na escolha do tratamento, levando em conta mais critérios decisivos.

6. REFERÊNCIAS

ARRUDA, N. P.; LIMA, C. S. A.; SCALIZE, S. P. Gestão dos serviços públicos de água e esgoto operados por municípios em Goiás, GO, Brasil. **Rev. Ambient. Água**, vol. 11, n. 2, p. 362-376, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7229: Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12209: Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos**. Rio de Janeiro, 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969: Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro, 1997.

BARROS, R. T. D. V. et al. **Manual de saneamento e proteção ambiental para os municípios**: Saneamento. 1. ed. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, v. 2, 1995.

BRASIL. Deliberação conjunta COPAM/CERH (Conselho Estadual de Recursos Hídricos), n.º 01 de 13 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 13 maio 2008, 32 p.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de Janeiro de 2007. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico; cria o Comitê Interministerial de Saneamento Básico; altera as Leis nºs 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.666, de 21 de junho de 1993, e 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; e revoga a Lei nº 6.528, de 11 de maio de 1978. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 5 de jan. 2007. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>. Acesso em: 28 fev. 2021.

BRASIL. Lei nº 14.026 de 15 de Julho de 2020. Atualiza o Marco Legal do Saneamento

Básico e altera as Leis n^{os} 9.984, de 17 de julho de 2000, 10.768, de 19 de novembro de 2003, 11.107, de 6 de abril de 2005, 11.445, de 5 de janeiro de 2007, 12.305, de 2 de agosto de 2010, 13.089, de 12 de janeiro de 2015 e a 13.529, de 4 de dezembro de 2017. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 15 de jul. 2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm>. Acesso em: 28 fev. 2021.

BRASIL. Resolução CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), n.º 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 17 mar. 2005, 27 p.

BRASIL. Portal da Transparência. 2020. Disponível em: <<http://www.portaltransparencia.gov.br/busca?termo=itutinga>>. Acesso em 16 jun. 2021.

BRASIL. Saneamento. Novo Marco de Saneamento é sancionado e garante avanços para o País. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/pt-br/noticias/transito-e-transportes/2020/07/novo-marco-de-saneamento-e-sancionado-e-garante-avancos-para-o-pais>>. Acesso em: 28 fev. 2021.

BRIX, H. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants-the root-zone method. **Water Science and Technology**, v. 19, n. 1/2, p. 107- 118, 1987.

CALIJURI, M. L. et al. **Tratamento de esgotos sanitários em sistemas reatores UASB/Wetland construídas de fluxo horizontal**: eficiência e estabilidade de remoção de matéria orgânica, sólidos, nutrientes e coliformes. **EngSanit Ambiental**, v. 14, n. 3, p 421-430, 2009.

CARVALHO, E. et al. DE CULTIVARES. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 34, n. 4, p. 892–899, 2010.

CERNICHARO, C.A.L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA-UFMG, v. 5, 2007, 379 p.

CHERNICHARO, C. A. L. et al. Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges. **Rev Environ Sci Biotechnol**, v. 14, p. 649–679, 2015.

CONLEY, L. M.; DICK, R. I.; LION, L. W. An Assessment of the Root Zone Method of Wastewater Treatment. **Research Journal of the Water Pollution Control Federation**, v. 63, n. 3, p. 239-247, 1991.

DINIZ, T. L. et al. O enquadramento de cursos d'água na legislação brasileira. **I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste**, 2006.

FAUSTINO, A. S. **Estudos físico-químicos do efluente produzido por fossa séptica biodigestora e o impacto do seu uso no solo**. 2007. 122 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

FERREIRA, P. S. F. et al. Avaliação preliminar dos efeitos da ineficiência dos serviços de saneamento na saúde pública brasileira. **Revista Internacional de Ciências**, v. 6, n. 2, p. 214-229, 2016.

FIELD, R.; FAN, C. Y. Industrial Reuse of Urban Stormwater. **Journal of the Environmental Engineering Division**, v. 107, n. 1, p. 171-189, 1981.

FIGUEIREDO, S. C. I. et al. **Fossa absorvente ou rudimentar aplicada ao saneamento rural: solução adequada ou alternativa precária?**. **Revista DAE**, v. 67, n. 220, p. 87-99, 2019.

GIKAS, G. D.; TSIHRINTZIS, V. A. Stabilization pond systems for wastewater treatment: facility costs and environmental footprint assessment. **Global Nest Journal**, v. 16, n. 2, p. 374-384, 2014.

GONÇALVES, R. F. et al. Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios. Rio de Janeiro: ABES/RiMa, (Projeto Prosab), 82 p., 2001.

GUIMARÃES, J. de J. et al. Utilização de Forrageira no tratamento de esgoto doméstico. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 92-110, 2018.

HADDAD, B. C. **Avaliação da codisposição de resíduos de fossa e tanque sépticos em sistema de tratamento de esgoto composto por lagoas anaeróbias, facultativas e de maturação**. 2013. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

HIDROWEB. Séries Históricas. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acesso em: 24 fev. 2021.

HO, L.; GOETHALS, L. M. P. Municipal wastewater treatment with pond technology: Historical review and future outlook. **Ecological Engineering**, v. 148, n. 1, p. 105-791, 2020.

IMHOFF, K. e K. R. Manual de Tratamento de Águas Residuárias. Ed. E. Blucher, 301 p., 1986.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Panorama Itutinga. 2018. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/itutinga/panorama>>. Acesso em: 25 fev. 2021.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Enquadramento da GD1. Belo Horizonte: Igam, 2013. 1 mapa. Escala: 1:575.000.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Saneamento é Saúde. O que é Saneamento?**. 2018a. Disponível em: <<http://tratabrasil.org.br/saneamento/o-que-e-saneamento>>. Acesso em: 28 fev. 2021.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Painel Saneamento Brasil. Indicadores por ano**. 2018b. Disponível em: <<https://www.painelsaneamento.org.br/explore/ano?SE%5Ba%5D=2018>>. Acesso em: 28 fev. 2021.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Benefícios econômicos e sociais da expansão do saneamento no Brasil**. 86 p., 2018c.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. 6. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011, 969 p.

KADLEC, R. H.; KNIGHT, R. L. **Treatment Wetlands**. Boca Raton, Florida: Lewis Publishers. 1996, 893 p.

KADLEC, R. H.; WALLACE, R. D. **Treatment Wetlands**. 2. ed. Florida: CRC Press, 2009, 1016 p.

LAGER, J. A., SMITH, W. G., TCHOBANOGLOUS, George. Catchbasin technology overview and assessment. Cincinnati, OH: EPA, 1977.

LISBOA, S. S.; HELLER, L.; SILVEIRA B. R. **Desafios do planejamento municipal de saneamento básico em municípios de pequeno porte: a percepção dos gestores**. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 18, n. 4, p. 341-348, 2013.

LOPES, B. C. et al. Potential use of Tifton 85 cultivated in VFCW for animal feed. **Water Practice & Technology**, v. 15, n. 3, p. 598-604, 2020.

MARQUES, D. da M. Terras úmidas construídas de fluxo subsuperficial. In: CAMPOS, R. (Coord). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES. 1999. p. 409-435.

MARQUES, G. H. C. et al. Evolução das concentrações de nitrato nas águas subterrâneas na cidade de Urânia/SP. **Águas Subterrâneas**, [S. l.], 2019. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/assubterraneas/article/view/29365>>. Acesso em: 15 maio. 2021.

MARIOSIA, F. D. et al. A agenda 2030 e o saneamento como indicador de sustentabilidade. **Revista Cerrados (Unimontes)**, v. 18, n. 01, p. 278-299, 2020.

MATOS, A. T. de; MATOS, M. P. de. Disposição de águas residuárias no solo e em sistemas alagados construídos. 1. ed. Viçosa: UFV, 371 p., 2017.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, Inc. International Edition, 1334 p. 1991.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Wastewater engineering: treatment, disposal, and reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, Inc. International Edition, 1815 p. 2003.

OLIJNYK, D. P. **Avaliação da nitrificação e desnitrificação de esgoto doméstico empregando filtros plantados com macrófitas (wetlands) de fluxos vertical e horizontal – sistemas híbridos**. 2008. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

OLIVEIRA, F. M. **Análise técnico-financeira de tecnologias convencionais e alternativas para o tratamento de esgoto sanitário em cidades de pequeno a grande porte**. 2018. 21 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

ORMONDE, V. S. S. **Avaliação de 'Wetlands' Construídos no Pós-Tratamento de efluente de Lagoa de Maturação**. 2012. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2012.

ORTIZ-CORREA, S. J. et al. Impact of access to water and sanitation services on educational attainment. **Water Resources and Economics**, v. 14, p. 31-43, 2016.

PEREIRA, E. P. **Influência do tratamento de esgotos em indicadores socioeconômicos no estado de Minas Gerais**. 2018. 38 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.

PHILIPPI, A. J. **Saneamento, saúde e ambiente: Fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Ed. Barueri. São Paulo. 2005.

ITUTINGA. **História**. 2019. Disponível em: <http://itutinga.mg.gov.br/?Meio=Pagina&INT_PAG=4330#:~:text=A%20altitude%20m%C3%A1xima%20encontra%20se,est%C3%A1%20a%20969%2C72%20m>. Acesso em 14 maio 2021.

ITUTINGA. **Fique por Dentro! – Urbanismo e Meio Ambiente**. 2019. Disponível em:

<http://www.itutinga.mg.gov.br/noticia/21059#inicio_noticia>. Acesso em: 03 maio 2021.

REDA, A. L. L.; MELLO, G. S. L. Drenagem de tormentas urbanas: Impacto sobre vazão e qualidade do esgoto coletado. In: **Encontro Estadual de Saneamento Ambiental**, v. 5, p. 1-2, jun. 2005. Lins. **Anais...** Lins: AESABESP, 2005.

RESENDE, D, E, A. **Avaliação da eficiência do sistema de tratamento de esgoto do município de Itutinga-MG**. 2017. 62 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

RIBEIRO, W. J.; ROOKE, S. M. J. **Saneamento básico e sua relação como meio ambiente e a saúde pública**. 2010. 37 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.

SEZERINO, H. P. et al. Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais. **Eng Sanit. Ambient.**, v. 20, n. 1, p. 151-158, 2015.

SILVA, G. M.; GONÇALVES, R. F. Desempenho de um sistema UASB + filtro biológico percolador sem etapa de decantação tratando esgoto sanitário (Performance of a UASB + trickling filter system without secondary settler treating domestic wastewater). In: **23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES. Anais...** Campo Grande, Brasil, 2004. (in Portuguese)

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS. **Atlas Esgotos: Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/snirh-1/atlas-esgotos>>. Acesso em: 24 fev. 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Mapa de indicadores de Água, Brasil**. Disponível em: <http://appsnis.mdr.gov.br/indicadores/web/agua_esgoto/mapa-agua>. Acesso em: 28 fev. 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Mapa de**

indicadores de Água, Itutinga/MG. Disponível em:
<http://appsnis.mdr.gov.br/indicadores/web/agua_esgoto/mapa-agua>. Acesso em: 25 fev. 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Mapa de indicadores de Esgoto, Brasil.** Disponível em:
<http://appsnis.mdr.gov.br/indicadores/web/agua_esgoto/mapa-esgoto>. Acesso em: 28 fev. 2021.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Mapa de indicadores de Esgoto, Itutinga/MG.** Disponível em:
<http://appsnis.mdr.gov.br/indicadores/web/agua_esgoto/mapa-esgoto>. Acesso em: 25 fev. 2021.

THOMANN, R. V. Systems analysis and water quality management. New York: **Environmental Science Services Division**, 1972.

TOURINHO, P. C. A. **Viabilidade Econômico-Financeira para Implantação de Sistemas Unitários em Pequenas Localidades.** 2001. 92 p. Mestrado em Ciências na área de Saúde Pública (Dissertação) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2001.

TSUTIYA, M.; SOBRINHO, A. P. **Coleta e transporte de esgoto sanitário.** DEHS/USP – Escola Politécnica. São Paulo, 547 p, 1999.

VERSIANI, B. M. et al. Fatores Intervenientes no Desempenho de um Reator UASB Submetido a Diferentes Condições Operacionais. In: **Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária Ambiental**, Campo Grande, MS, 2005.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos.** v. 2. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA; Universidade Federal de Minas Gerais, 1997. 416 p.

VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização. Princípios do tratamento biológico de**

águas residuárias. 2. ed. v. 3. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA; Universidade Federal de Minas Gerais, 2002, 196 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. 452 p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA; Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. 452 p.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias: Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos.** 4. ed. v. 1. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA; Universidade Federal de Minas Gerais, 2017, 472 p.

XIAN-WEN, L. Technical economic analysis of stabilization ponds. **Water Science and Technology.** v. 31, n. p. 103-110, 1995.