



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

**ELABORAÇÃO DE PROPOSTA DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ESGOTOS PARA NAZARENO (MG)**

Catharina Dias Bolognani Ferreira

Belo Horizonte

2025

Catharina Dias Bolognani Ferreira

**ELABORAÇÃO DE PROPOSTA DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ESGOTOS PARA NAZARENO (MG)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Ambiental e Sanitarista

Orientador: Prof. Dr. Túlio Cesar Floripes Gonçalves

Belo Horizonte

2025

CATHARINA DIAS BOLOGNANI FERREIRA

**ELABORAÇÃO DE PROPOSTA DE PRÉ-DIMENSIONAMENTO PARA ESTAÇÃO
DE TRATAMENTO DE ESGOTOS PARA NAZARENO (MG)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista.

Aprovado em 16 de dezembro de 2025

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **TULIO CESAR FLORIPES GONCALVES**
Data: 31/12/2025 10:40:43 0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Túlio Cesar Floripes Gonçalves – Presidente da Banca Examinadora
Prof. Dr. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Orientador

Documento assinado digitalmente
 **ALEXANDRE DE CASTRO LEAL**
Data: 29/12/2025 08:08:31-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Alexandre de Castro Leal
Subsecretário de Fiscalização Ambiental da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais

Tiago Borges Ferreira
Prof. Dr. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC Nº 18/2025 - DCTA (11.55.03)

(Nº do Protocolo: NÃO PROTOCOLADO)

Documento assinado digitalmente

 ALEXANDRE DE CASTRO LEAL
Data: 29/12/2025 08:07:29-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

(Assinado digitalmente em 16/12/2025 17:52)

*TIAGO BORGES FERREIRA
PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO
DCTA (11.55.03)
Matrícula: ####585#8*

Visualize o documento original em <https://sig.cefetmg.br/documentos/> informando seu número: 18, ano: 2025, tipo: **FOLHA DE APROVAÇÃO DE TCC**, data de emissão: 16/12/2025 e o código de verificação: 3f87586de9

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força, pela proteção diária e por iluminar meu caminho em todos os momentos, especialmente naqueles em que duvidei da minha própria capacidade. Sem Sua presença, esta conquista não seria possível.

Aos meus pais, Míriam e Eduardo, expresso minha gratidão mais profunda. Obrigada por todo o suporte, pelo amor incondicional, pelos conselhos, pela paciência e por sempre acreditarem no meu potencial, mesmo quando eu mesma hesitava. Cada conquista minha também é de vocês, que sempre fizeram o impossível para me proporcionar as melhores oportunidades.

Ao meu namorado, Guilherme, agradeço por ser meu porto seguro ao longo de toda essa jornada. Obrigada por cada palavra de incentivo, por celebrar comigo as pequenas vitórias e por me confortar nos momentos de cansaço e incerteza. Sua presença tornou esse caminho mais leve e me deu coragem para seguir até o fim.

Aos meus colegas do CEFET, em especial à Júlia, deixo meu carinho e gratidão por todas as conversas, pelas risadas e pelos desafios compartilhados ao longo da graduação. Foram vocês que tornaram essa etapa mais leve, significativa e repleta de boas memórias que levarei comigo para sempre.

Por fim, agradeço ao meu orientador, que se mostrou sempre solícito, atencioso e comprometido com o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação, paciência e disponibilidade nos momentos de dificuldade foram fundamentais para que este TCC pudesse ser concluído com qualidade. Sou imensamente grata por ter contado com sua orientação ao longo deste percurso.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo elaborar uma proposta de dimensionamento de uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) para o município de Nazareno (MG), considerando as características locais de geração de efluentes, projeções populacionais e parâmetros técnicos e ambientais vigentes. O estudo foi desenvolvido a partir do diagnóstico da situação atual do sistema de esgotamento sanitário, complementado por análises demográficas, hidráulicas e de qualidade do efluente. Com base nos dados obtidos, aplicou-se a projeção populacional aritmética para o horizonte de 2050, estimando-se as vazões médias e máximas de esgoto. O dimensionamento da ETE adotou como solução tecnológica um sistema combinado composto por Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB) seguido de Lagoa Facultativa como pós-tratamento. Essa configuração demonstrou-se tecnicamente viável e ambientalmente adequada, atendendo aos padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 e pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG nº 8/2022. A proposta evidencia que a implantação da ETE contribuirá significativamente para a melhoria da qualidade ambiental, proteção dos recursos hídricos e promoção da saúde pública, consolidando um passo essencial rumo à universalização do saneamento básico em municípios de pequeno porte.

Palavras-chave: Estação de Tratamento de Esgoto. Esgotamento Sanitário. Dimensionamento. Sustentabilidade Ambiental. Nazareno (MG).

ABSTRACT

The present study aimed to develop a design proposal for a Wastewater Treatment Plant (WWTP) for the municipality of Nazareno, Minas Gerais, Brazil, considering local characteristics of effluent generation, population projections, and current technical and environmental parameters. The study was based on a diagnosis of the existing sanitary sewer system, complemented by demographic, hydraulic, and effluent quality analyses. Based on the collected data, an arithmetic population projection was applied for the planning horizon up to the year 2050, allowing the estimation of average and maximum wastewater flows. The WWTP design adopted a combined treatment system consisting of an Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) reactor followed by a Facultative Lagoon as a post-treatment stage. This configuration proved to be technically feasible and environmentally adequate, complying with the effluent discharge standards established by CONAMA Resolution No. 430/2011 and the Joint Normative Resolution COPAM-CERH/MG No. 8/2022. The proposed system is expected to significantly contribute to improvements in environmental quality, protection of water resources, and the promotion of public health, representing an essential step toward the universalization of basic sanitation in small-sized municipalities.

Keywords: Wastewater Treatment Plant. Sanitary Sewerage. Design. Environmental Sustainability. Nazareno (MG).

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 12 |
| 2. OBJETIVOS..... | 15 |
| 2.1. Objetivo Geral | 15 |
| 2.2. Objetivos Específicos | 15 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 16 |
| 3.1. Panorama do saneamento básico no Brasil, com foco no esgotamento sanitário e nas pequenas cidades. | 16 |
| 3.2. Características do esgoto doméstico..... | 19 |
| 3.2.1. Indicadores de Matéria Orgânica e Sólidos..... | 20 |
| 3.2.2. Nutrientes, Fatores Físico-Químicos e Contaminantes Específicos | 21 |
| 3.3. Conceitos Técnicos do Sistema de Esgotamento Sanitário | 23 |
| 3.3.1. Tipos de Sistemas de Esgotamento Sanitário | 23 |
| 3.3.2. Configuração das Redes Coletoras: Rede Simples e Rede Dupla | 25 |
| 3.3.3. Elementos e Acessórios da Rede Coletora | 27 |
| 3.4. Tecnologias de tratamento de esgoto | 31 |
| 3.4.1. Estágios de Tratamento | 33 |
| 3.4.2. Reatores Anaeróbios: UASB | 34 |
| 3.4.3. Lagoas de Estabilização..... | 35 |
| 3.4.4. Lodos Ativados..... | 36 |
| 3.5. Critérios normativos e ambientais | 38 |
| 3.5.1. Resolução CONAMA Nº 357/2005 | 38 |
| 3.5.2. Resolução CONAMA Nº 430/2011 | 39 |
| 3.5.3. Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG Nº 8 | 42 |

| | |
|---|----|
| 4. METODOLOGIA..... | 43 |
| 4.1. Projeção Populacional | 44 |
| 4.2. Estimativa de Vazões e Cargas..... | 46 |
| 4.3. Escolha do Sistema de Tratamento..... | 48 |
| 4.4. Critérios de Dimensionamento das Unidades..... | 49 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 51 |
| 5.1. Diagnóstico da Situação Atual | 51 |
| 5.2. População Projetada | 56 |
| 5.3. Vazão máxima de esgoto..... | 57 |
| 5.4. Dimensionamento Geral da ETE..... | 59 |
| 5.4.1. Calha Parshall | 59 |
| 5.4.2. Caixa de Areia (Desarenador) | 61 |
| 5.4.3. Gradeamento..... | 63 |
| 5.4.4. Reator Anaeróbio (UASB) | 65 |
| 5.4.5. Lagoa Facultativa | 66 |
| 6. CONCLUSÕES | 68 |
| 7. REFERÊNCIAS | 70 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 3.1 - Separador Combinado | 24 |
| Figura 3.2 - Separador Combinado | 25 |
| Figura 3.3 - Rede Simples | 26 |
| Figura 3.4 - Rede Dupla | 27 |
| Figura 3.5 - Interceptor..... | 27 |
| Figura 3.6 - Poço de Visita | 28 |
| Figura 3.7 - Terminal de Limpeza..... | 29 |
| Figura 3.8 - Caixa de Passagem..... | 29 |
| Figura 3.9 - Sifões Invertidos | 30 |
| Figura 3.10 - Elevatória de Esgoto | 31 |
| Figura 3.11 -Fluxograma Etapas do Tratamento do Esgoto..... | 32 |
| Figura 4.1 - Sub-Bacias de Implantação..... | 44 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1 - Paramêtros Adotados..... | 50 |
| Tabela 5.1 - População Calculada | 56 |
| Tabela 5.2 - Tabela para dimensionamento da Calha <i>Parshall</i> | 60 |
| Tabela 5.3 - Vazão Calculada..... | 61 |
| Tabela 5.4 - Tabela Vazões | 61 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

APP – Área de Preservação Permanente

CP – Caixa de Passagem

EEE – Estação Elevatória de Esgotos

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FGTS – Fundo de Garantia por Tempo de Serviço

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INBEC – Instituto Brasileiro de Educação e Cultura

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OMS – Organização Mundial da Saúde

ONU – Organização das Nações Unidas

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

PE – População Equivalente

PL – População Limite

PMSB – Plano Municipal de Saneamento Básico

PRÁXIS – Empresa contratada para estudo socioeconômico de Nazareno

PV – Poço de Visita

QGIS – *Quantum Geographic Information System*

SES-MG – Secretaria de Estado de Saúde de Minas Gerais

SEMAD-MG – Secretaria de Estado de Meio Ambiente de Minas Gerais

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

TIL – Terminal de Inspeção e Limpeza

TL – Terminal de Limpeza

UNICEF – Fundo das Nações Unidas para a Infância

UASB – Reator Anaeróbio de Manta de Lodo

WASH – *Water, Sanitation and Hygiene* (Água, Saneamento e Higiene)

1. INTRODUÇÃO

O saneamento básico é reconhecido globalmente como um fator determinante para a saúde pública, o desenvolvimento socioeconômico e a sustentabilidade ambiental. A Organização Mundial da Saúde (OMS) enfatiza que o acesso à água potável e ao esgotamento sanitário adequado é essencial para prevenir doenças. Segundo a OMS (2023), aproximadamente 2,2 bilhões de pessoas no mundo não dispõem de água segura, e 3,5 bilhões carecem de serviços de saneamento gerenciados adequadamente. A organização ressalta que a falta de saneamento contribui para doenças diarréicas, responsáveis por cerca de 485 mil mortes anuais de crianças (OMS; UNICEF, 2021).

O Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) complementa essa perspectiva destacando os impactos negativos na infância. De acordo com a UNICEF (2022), a ausência de saneamento adequado está associada ao aumento da mortalidade infantil, à desnutrição crônica e a prejuízos no desenvolvimento cognitivo. A instituição desenvolve iniciativas como o programa WASH (*Water, Sanitation and Hygiene*) para ampliar o acesso a esses serviços em comunidades vulneráveis.

Em escala global, a Organização das Nações Unidas (ONU) integra o saneamento básico aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especificamente no ODS 6, que visa assegurar a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos até 2030 (ONU, 2015).

Diante dessas evidências, conclui-se que o saneamento básico é um pilar indispensável para a saúde coletiva, a equidade social e o crescimento econômico, exigindo políticas públicas eficientes e investimentos contínuos. Sendo assim, é de suma importância que as cidades possuam e atendam aos objetivos instaurados pelo ODS 6 - Água potável e Saneamento.

No Brasil, o saneamento básico é reconhecido como um direito social fundamental pela Constituição Federal de 1988 (Art. 6º) e desempenha um papel crucial na saúde pública, na garantia da dignidade humana e no desenvolvimento urbano sustentável. Mais do que o fornecimento de água potável, ele engloba um sistema integrado de serviços e infraestruturas

destinados a assegurar condições sanitárias adequadas, prevenir enfermidades e reduzir impactos ambientais, constituindo-se como um pilar essencial para o bem-estar da população.

De acordo com a Lei Federal nº 11.445/2007, que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico no Brasil, esse conjunto abrange quatro componentes fundamentais: o abastecimento de água potável; o esgotamento sanitário; o manejo de resíduos sólidos; e a drenagem e o manejo das águas pluviais urbanas. A ausência ou precariedade desses serviços impacta diretamente a saúde pública, intensificando a propagação de doenças e agravando desigualdades sociais, especialmente em áreas urbanas periféricas e comunidades de baixa renda.

Contudo, conforme demonstrado pela Pesquisa de Perfil Socioeconômico de Nazareno-MG (Práxis, 2022), municípios de pequeno porte ainda enfrentam significativas disparidades na prestação desses serviços, particularmente no que tange ao esgotamento sanitário.

Em Nazareno, os dados revelam que, embora 95,1% dos domicílios urbanos estejam conectados à rede pública de esgoto (Práxis, 2022), representando um avanço em relação aos 84% registrados em 2010 (IBGE, 2010), persistem graves inadequações: 4,5% das residências utilizam fossas sépticas, 0,3% lançam efluentes diretamente em cursos d'água e 0,1% realizam despejos em vias públicas (PRÁXIS, 2022, p. 16). Essas deficiências concentram-se especialmente no bairro Rosário e no entorno do Pastinho, áreas que apresentam simultaneamente os piores indicadores de infraestrutura e os maiores índices de densidade populacional (78 hab./ha no setor censitário 16) (Práxis, 2022, p. 21-22).

A problemática do saneamento em Nazareno reflete um cenário nacional de desigualdades territoriais. Como afirma Heller (2018, p. 45), "o acesso aos serviços de saneamento básico no Brasil ainda espelha as profundas assimetrias socioespaciais do país". Essa afirmação encontra eco nos dados locais, que demonstram uma clara correlação entre precariedade sanitária e vulnerabilidade social: 23% das famílias encontram-se na linha da pobreza (Práxis, 2022, p. 42).

É imperativo, portanto, que a gestão municipal de Nazareno direcione esforços e investimentos prioritários para a expansão e aprimoramento do sistema de esgotamento sanitário, culminando

na construção e operação eficiente de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). A implementação da ETE não apenas endereçará a inadequação crônica do lançamento de efluentes *in natura*, eliminando os riscos de contaminação hídrica e a propagação de doenças nas áreas mais vulneráveis (como o Rosário e o Pastinho), mas também se alinhará diretamente aos objetivos do ODS 6 e à Lei nº 11.445/2007. Tal medida representa o passo decisivo para transformar o esgoto coletado em água tratada, promovendo a saúde pública, a dignidade humana e a sustentabilidade ambiental, e consolidando um avanço estrutural que beneficiará toda a comunidade e o ecossistema local.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Elaborar uma proposta de dimensionamento de uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) para o município de Nazareno (MG), considerando as características locais de geração de efluentes, projeções populacionais e parâmetros técnicos de projeto, de modo a atender às exigências legais e ambientais vigentes.

2.2. Objetivos Específicos

- Realizar o levantamento de dados sobre o sistema de esgotamento sanitário de Nazareno (MG), incluindo informações demográficas, consumo de água, cobertura de rede coletora e características do corpo receptor.
- Projetar as vazões de esgoto com base na população atual e futura do município, utilizando métodos de projeção populacional e coeficientes de contribuição adotados pela literatura técnica.
- Estimar as cargas orgânicas e hidráulicas geradas, determinando os parâmetros de dimensionamento necessários para as unidades de tratamento.
- Definir e dimensionar as unidades componentes da ETE, de acordo com critérios técnicos, parâmetros operacionais e eficiência de remoção exigida pelas legislações ambientais (CONAMA nº 430/2011 e COPAM-CERH/MG nº 8/2022).
- Comparar a proposta de dimensionamento com as soluções existentes ou previstas no Plano Municipal de Saneamento Básico, avaliando a adequação técnica, eficiência e viabilidade operacional.
- Apresentar recomendações técnicas e operacionais voltadas à implantação e manutenção do sistema, considerando aspectos de sustentabilidade, custo e simplicidade operacional.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Panorama do saneamento básico no Brasil, com foco no esgotamento sanitário e nas pequenas cidades.

O saneamento básico é um serviço essencial à promoção da saúde pública, à qualidade de vida da população e à proteção do meio ambiente. Conforme definido pela Lei nº 14.026/2020, conhecida como o Novo Marco Legal do Saneamento, o saneamento abrange os serviços de abastecimento de água potável, coleta e tratamento de esgotos sanitários, manejo de resíduos sólidos urbanos e drenagem e manejo das águas pluviais urbanas (BRASIL, 2020).

No Brasil, a história do saneamento básico tem sido marcada por avanços pontuais, mas também por desigualdades estruturais, especialmente entre grandes centros urbanos e pequenas cidades, e entre regiões como Sudeste e Norte. Embora o acesso à água potável tenha atingido índices relativamente elevados nas últimas décadas, o déficit de cobertura nos serviços de coleta e tratamento de esgoto, manejo de resíduos e drenagem urbana ainda é um grande desafio nacional.

Nesse contexto, destaca-se a recente mudança institucional no sistema oficial de informações sobre saneamento no Brasil. Até o ano de 2023, o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) foi o principal instrumento de coleta, consolidação e divulgação de dados relativos à prestação dos serviços de saneamento básico no país, abrangendo abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e drenagem urbana. A partir de 2024, o SNIS foi substituído pelo Sistema Nacional de Informações em Saneamento Básico (SINISA), que passou a desempenhar essa função de forma integrada e ampliada. O SINISA foi instituído em atendimento às diretrizes da Lei nº 11.445/2007, atualizada pela Lei nº 14.026/2020, com o objetivo de aprimorar a transparência, a padronização e a confiabilidade dos dados, além de subsidiar o planejamento, a regulação e a formulação de políticas públicas voltadas à universalização dos serviços de saneamento básico no país.

Dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2018) apontaram que 83,6% da população brasileira tinha acesso ao abastecimento de água potável, enquanto apenas 53,2% dispunham de coleta de esgoto, e cerca de 46,3% tinham esgoto tratado. Além disso, o

Atlas Esgotos (ANA, 2017) revelou que 38,6% dos esgotos gerados no país não eram sequer coletados, e 18,8% eram coletados, mas lançados nos corpos hídricos sem nenhum tipo de tratamento, agravando a contaminação dos mananciais.

Esses indicadores evidenciam um quadro preocupante, com reflexos diretos na saúde da população, na qualidade ambiental e no desenvolvimento socioeconômico. Segundo o INBEC (2025), o Brasil ainda convive com mais de 35 milhões de pessoas sem acesso à água potável e cerca de 100 milhões sem acesso adequado ao sistema de esgotamento sanitário. Essas carências são mais críticas nas regiões Norte e Nordeste, bem como nas periferias de grandes centros urbanos das regiões Sudeste e Sul.

Além dos déficits estruturais, a gestão do saneamento no Brasil enfrenta desafios de natureza administrativa e institucional. Um dos problemas apontados por diversos autores é a fragmentação da gestão, com a presença de múltiplos prestadores de serviços, incluindo companhias estaduais, concessionárias privadas e serviços autônomos municipais. Isso gera dificuldades na implementação de soluções integradas e de longo prazo, além de limitar a capacidade de planejamento regionalizado (INBEC, 2025).

Outro fator relevante é o baixo nível de investimento histórico no setor, associado a dificuldades de financiamento por parte dos municípios de pequeno porte, que muitas vezes não possuem capacidade técnica e financeira para realizar obras de grande porte em saneamento. O Novo Marco Legal do Saneamento busca enfrentar essa limitação ao estimular a regionalização dos serviços e ao abrir espaço para maior participação da iniciativa privada, por meio de Parcerias Público-Privadas (PPPs) e concessões (BRASIL, 2020).

No entanto, estudos como o de Vieira et al. (2025) alertam que, sem políticas públicas que priorizem as pequenas cidades, há risco de aprofundamento das desigualdades já existentes. Ao analisar a Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte (RMVPLN), os autores demonstraram que os municípios com menos de 50 mil habitantes apresentam cobertura significativamente menor de esgotamento sanitário, além de índices mais altos de internações por doenças de veiculação hídrica. O estudo aponta que os municípios pequenos têm, em média, 20% menos cobertura de esgoto e 156% mais internações por diarreia quando comparados aos municípios maiores da mesma região.

Esses dados confirmam que a falta de saneamento básico agrava diretamente os indicadores de saúde pública, além de aumentar os custos com internações hospitalares e impactar negativamente o desenvolvimento local. De acordo com o INBEC (2025), o déficit de saneamento é um dos principais fatores associados à mortalidade infantil e a doenças de veiculação hídrica, como diarreia, hepatite A e leptospirose.

O caso de Minas Gerais é um exemplo expressivo dos desafios enfrentados em nível estadual. Segundo o estudo “Saneamento é Saúde”, publicado pelo Instituto Trata Brasil (2025), Minas liderou, em 2024, o ranking nacional de internações por doenças relacionadas ao saneamento ambiental inadequado, com 47.612 casos, o que representou uma taxa de 22,3 internações por 10 mil habitantes, bem acima da média nacional (16,2/10 mil habitantes).

O estudo aponta que a maior parte das internações em Minas foi causada por doenças transmitidas por insetos vetores, como a dengue, que representou 75% das internações no estado. Os demais casos foram relacionados a doenças de transmissão feco-oral, doenças por contato com a água, problemas ligados à falta de higiene e infecções por geohelmintos.

Em relação à mortalidade, Minas Gerais registrou 1.778 óbitos em 2024, ficando atrás apenas de São Paulo. Desse total, 66% foram causados por doenças transmitidas por vetores, especialmente arboviroses, como a dengue. O estudo também destaca que, nos últimos anos, houve uma redução nas doenças tradicionalmente ligadas à falta de água potável e coleta de esgoto, como as doenças feco-oraais, mas, em contrapartida, observou-se um aumento expressivo nas doenças transmitidas por vetores, agravadas pelas condições inadequadas de drenagem urbana e manejo de resíduos sólidos.

Apesar dos investimentos recentes anunciados pela Copasa, com previsão de R\$ 17 bilhões até 2029, para universalizar os serviços até 2033, os indicadores mostram que o estado ainda precisa avançar em termos de tratamento de esgoto, já que apenas 43,7% do esgoto gerado é tratado atualmente, segundo dados do Trata Brasil (2025).

A Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD-MG) e a Secretaria de Estado de Saúde (SES-MG) têm trabalhado na elaboração do Plano Estadual de Saneamento Básico (PESB-MG), com o objetivo de melhorar os índices de cobertura,

principalmente em municípios menores e com menor capacidade arrecadatória. Além disso, programas como o Vigiagua vêm sendo implementados com foco na vigilância da qualidade da água destinada ao consumo humano.

Diante desse cenário, a universalização do saneamento no Brasil, prevista para 2033 pelo Novo Marco Legal, exige planejamento integrado, forte investimento público e privado, melhoria na gestão local, capacitação técnica dos municípios e o fortalecimento da regulação federal pela ANA. Além disso, torna-se fundamental a adoção de tecnologias adaptadas à realidade das pequenas cidades, a educação ambiental da população e a integração entre saúde, meio ambiente e desenvolvimento urbano.

O conjunto dos dados apresentados reforça a necessidade de uma abordagem multidimensional para o saneamento básico no Brasil, que vá além da infraestrutura, incorporando aspectos sociais, ambientais e de gestão pública, de modo a reduzir as desigualdades territoriais e garantir efetivamente o direito à saúde e ao meio ambiente equilibrado para toda a população.

3.2. Características do esgoto doméstico

O esgoto doméstico, também denominado água resíduária doméstica, é o efluente gerado a partir do uso da água em domicílios e estabelecimentos de serviços. Ele é constituído essencialmente por água (cerca de 99,9% do total) e uma pequena fração de contaminantes orgânicos, inorgânicos e biológicos (von Sperling, 2020). Essa fração, embora aparentemente insignificante, é responsável por um elevado potencial poluidor, dada a presença de substâncias biodegradáveis, nutrientes e microrganismos patogênicos.

O lançamento de esgoto doméstico sem tratamento adequado é reconhecido como uma das principais causas da degradação da qualidade da água em corpos receptores. A matéria orgânica presente no efluente consome oxigênio dissolvido (OD) durante o processo de decomposição biológica, reduzindo a disponibilidade de oxigênio para organismos aquáticos e podendo levar à asfixia da biota, além de gerar odores desagradáveis e favorecer a proliferação de vetores (von Sperling, 2020).

De modo geral, o teor de OD no esgoto bruto é nulo ou muito próximo de zero, uma vez que a demanda de oxigênio para oxidar a matéria orgânica supera a capacidade de reoxigenação

natural do efluente. Assim, a caracterização físico-química e biológica do esgoto torna-se fundamental para o correto dimensionamento das unidades de tratamento e para a previsão de seu comportamento em sistemas biológicos e no meio ambiente (Metcalf; Eddy, 2016).

A caracterização deve abranger parâmetros representativos das principais cargas poluentes, como a matéria orgânica (Demanda Bioquímica de Oxigênio e Demanda Química de Oxigênio), os sólidos (Sólidos Suspensos Totais e Sólidos Dissolvidos Totais), os nutrientes (Nitrogênio e Fosforo), os microrganismos e, eventualmente, contaminantes específicos (metais pesados, detergentes, compostos emergentes). Esses parâmetros permitem estimar o impacto potencial do esgoto sobre o corpo receptor e definir as tecnologias de tratamento mais adequadas às características locais e às exigências legais (von Sperling, 2020).

A análise dos parâmetros de caracterização do esgoto é indispensável tanto para o dimensionamento das Estações de Tratamento de Esgoto quanto para o monitoramento de desempenho operacional. Cada parâmetro fornece informações específicas sobre a natureza do efluente e o comportamento esperado durante as etapas de tratamento físico, biológico e químico (Metcalf; Eddy, 2016; von Sperling, 2020).

Esses parâmetros também servem como base para avaliar a eficiência das unidades, verificar o atendimento aos padrões de lançamento estabelecidos pela legislação ambiental e garantir a proteção dos corpos hídricos receptores, conforme as diretrizes do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

3.2.1. Indicadores de Matéria Orgânica e Sólidos

A matéria orgânica é o principal componente de interesse no esgoto doméstico, pois está diretamente relacionada à poluição de origem antrópica. Sua quantificação é fundamental para o dimensionamento das unidades biológicas, sendo representada principalmente pelos indicadores DBO e DQO.

- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅): representa a quantidade de oxigênio necessário para a decomposição biológica da matéria orgânica biodegradável ao longo de cinco dias, sob condições controladas. É o parâmetro clássico de referência no projeto de ETEs e expressa a carga poluidora potencial do efluente. No esgoto doméstico bruto brasileiro, os valores médios variam entre 300 e 350 mg/L, com contribuição per capita

de aproximadamente 54 gDBOs/hab.dia. O cálculo da carga orgânica afluente (kg DBO/dia) é a base para o dimensionamento de unidades como reatores UASB e sistemas de lodos ativados (von Sperling, 2020).

- Demanda Química de Oxigênio (DQO): quantifica a matéria orgânica total, incluindo as frações biodegradável e não biodegradável, por meio da oxidação química. A relação DQO/DBOs varia entre 1,2 e 2,0 em esgotos predominantemente domésticos, indicando uma alta proporção de compostos biodegradáveis e, portanto, favorável aos processos biológicos (Metcalf; Eddy, 2016).
- Sólidos Suspensos Totais (SST): correspondem à fração não filtrável do esgoto, composta por partículas de origem orgânica e inorgânica. O valor típico de SST no esgoto bruto situa-se entre 150 e 450 mg/L. O parâmetro é essencial para o dimensionamento de unidades de sedimentação e clarificação, principalmente o decantador secundário, responsável pela separação da biomassa do líquido clarificado e pela recirculação do lodo ativo ao reator (von Sperling, 1996).
- Sólidos Sedimentáveis (SSed): medem o volume de sólidos que sedimentam no período de uma hora, sendo normalmente expressos em mL/L. Os valores típicos variam entre 10 e 20 mL/L, refletindo a eficiência da pré-sedimentação e do manejo de lodo (von Sperling, 1996).
- Sólidos Dissolvidos Totais (SDT): correspondem à fração dos sólidos que atravessa o meio filtrante padrão utilizado nas análises laboratoriais. Embora fisicamente incluam partículas coloidais e substâncias dissolvidas, na prática da engenharia sanitária, o limite de separação entre sólidos em suspensão e dissolvidos é definido pela porosidade do filtro, usualmente variando entre 0,45 μm e 1,2 μm (von Sperling, 2020).

A caracterização dos sólidos permite avaliar o potencial de formação de lodo e prever a necessidade de unidades de adensamento, digestão e desaguamento, etapas indispensáveis para o manejo final de resíduos gerados no processo.

3.2.2. Nutrientes, Fatores Físico-Químicos e Contaminantes Específicos

Os nutrientes, como nitrogênio e fósforo, e os fatores físico-químicos, como pH, temperatura e alcalinidade, influenciam diretamente o equilíbrio biológico dos sistemas de tratamento e dos

corpos receptores. O controle adequado desses parâmetros é essencial para prevenir fenômenos como eutrofização, toxicidade e inibição microbiológica.

- Nutrientes (Nitrogênio e Fósforo): o Nitrogênio Total (NT) e o Fósforo Total (P) são os principais responsáveis pelo enriquecimento trófico dos ecossistemas aquáticos, promovendo a proliferação excessiva de algas e cianobactérias. Enquanto o Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) representa apenas a soma do nitrogênio orgânico e amoniácal, o Nitrogênio Total engloba também as formas oxidadas (nitrito e nitrato), sendo o parâmetro mais completo para avaliar o impacto no corpo receptor. Em esgotos domésticos brutos, onde predominam as formas reduzidas, os valores médios de nitrogênio variam entre 40 e 80 mg/L, enquanto o fósforo total apresenta valores entre 4 e 15 mg/L. A remoção eficiente desses compostos é alcançada por meio de processos biológicos específicos (nitrificação, desnitrificação e remoção biológica de fósforo) ou tratamentos físico-químicos (von Sperling, 2014).
- Temperatura e pH: a temperatura do esgoto, normalmente entre 20 °C e 25 °C, influencia as taxas de reação e os processos metabólicos microbianos. O pH deve ser mantido entre 5,5 e 8,5 para garantir a estabilidade das comunidades biológicas responsáveis pela depuração do efluente (Metcalf; Eddy, 2016).
- Alcalinidade: expressa a capacidade do sistema de neutralizar ácidos e manter o pH estável. Durante a nitrificação, há consumo significativo de alcalinidade; portanto, sua manutenção é essencial para evitar oscilações no pH que possam comprometer a eficiência dos processos biológicos (von Sperling, 2020).
- Microrganismos Patogênicos: o esgoto doméstico contém uma grande variedade de microrganismos, incluindo bactérias, vírus e protozoários. Os coliformes termotolerantes são utilizados como indicadores de contaminação biológica, apresentando concentrações médias da ordem de 10^7 organismos/100 mL no esgoto bruto. Para atender aos padrões de qualidade sanitária, é necessária a adoção de processos de desinfecção, como cloração, radiação ultravioleta ou lagoas de maturação (von Sperling, 2020).
- Metais Pesados e Poluentes Emergentes: embora menos frequentes no esgoto estritamente doméstico, elementos como chumbo, cádmio e cobre, bem como compostos emergentes (fármacos e cosméticos), podem estar presentes em

concentrações que representam risco à saúde e ao meio ambiente. Sua remoção requer processos avançados, como adsorção, troca iônica, precipitação química ou tratamento terciário de polimento (Metcalf; Eddy, 2016).

Em síntese, o dimensionamento de uma ETE é um processo que equilibra princípios de engenharia, microbiologia e sustentabilidade ambiental. A caracterização detalhada do esgoto permite selecionar a tecnologia de tratamento mais adequada, definir a eficiência necessária de remoção e assegurar o atendimento aos padrões legais de lançamento. Assim, a análise criteriosa dos parâmetros de DBO, DQO, SST, nutrientes e coliformes constitui a base para um tratamento eficaz, capaz de proteger o corpo receptor contra a depleção de oxigênio, a eutrofização e a contaminação microbiológica (von Sperling, 2020).

3.3. Conceitos Técnicos do Sistema de Esgotamento Sanitário

Os sistemas de esgotamento sanitário têm como finalidade proteger a saúde pública e o meio ambiente, garantindo a coleta, transporte e tratamento adequado dos esgotos gerados pelas atividades humanas. Sua ausência ou funcionamento inadequado pode comprometer a qualidade da água, tornando-a imprópria para o consumo humano e para a vida aquática (von Sperling, 2005).

O dimensionamento de redes de esgotamento sanitário em áreas urbanas exige a adoção de soluções técnicas que atendam à realidade topográfica, à densidade populacional e às características de crescimento urbano da área em estudo. Para garantir eficiência, economia e sustentabilidade, é fundamental conhecer os diferentes tipos de sistemas de esgotamento, suas aplicações e os elementos que compõem a infraestrutura de coleta e transporte.

3.3.1. Tipos de Sistemas de Esgotamento Sanitário

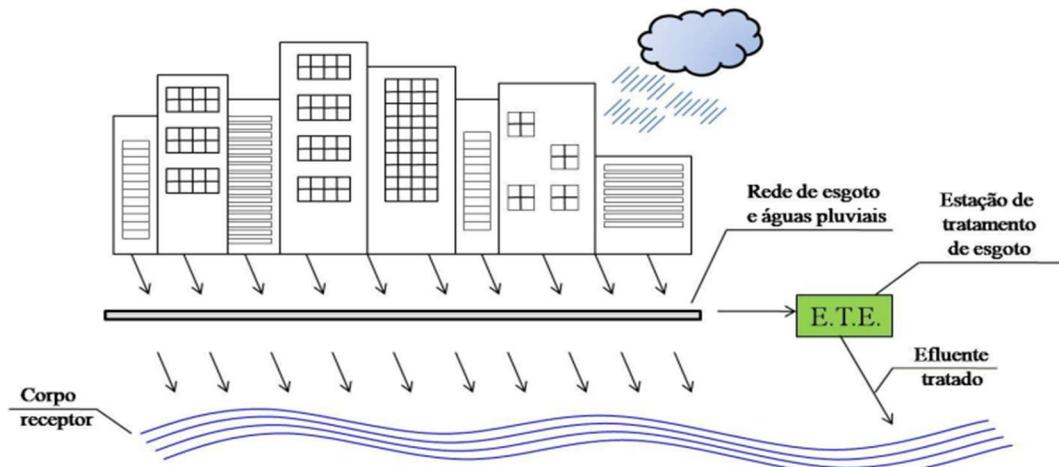
De acordo com Alem Sobrinho e Tsutiya (2000), os sistemas de esgotamento sanitário podem ser classificados, quanto à forma de coleta e condução das águas, em três categorias principais: sistema unitário (ou combinado), sistema separador parcial e sistema separador absoluto.

a) Sistema Unitário (Combinado)

O sistema unitário, também conhecido como sistema combinado, é caracterizado por utilizar uma única rede de tubulações para transportar simultaneamente as águas residuárias, as águas pluviais e as águas de infiltração. Todo o volume coletado é direcionado à ETE.

Contudo, esse sistema apresenta desvantagens operacionais importantes, principalmente em períodos de chuvas intensas, quando há grande variação de vazão e diluição dos poluentes. Isso pode comprometer a eficiência do tratamento e, em casos extremos, resultar em transbordamentos e descargas não tratadas em corpos hídricos, como mostra a Figura 3.1 (Sobrinho; Tsutiya, 2000).

Figura 3.1 - Separador Combinado

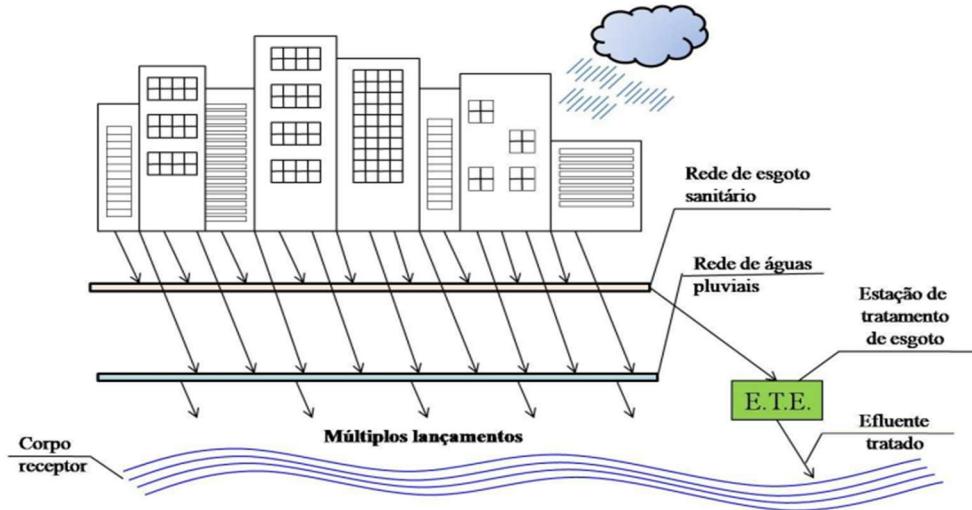


Fonte: Mendonça, 2019

b) Sistema Separador Parcial

No sistema separador parcial, apresentado na Figura 3.2, a rede coletora transporta as águas residuárias e parte das águas pluviais, como aquelas provenientes de telhados e áreas pavimentadas das edificações. Embora reduza o volume de água encaminhado para a ETE, ainda existe o risco de sobrecarga em eventos de chuva e de prejuízo à eficiência do tratamento (Sobrinho; Tsutiya, 2000).

Figura 3.2 - Separador Combinado



Fonte: Mendonça, 2019

c) Sistema Separador Absoluto

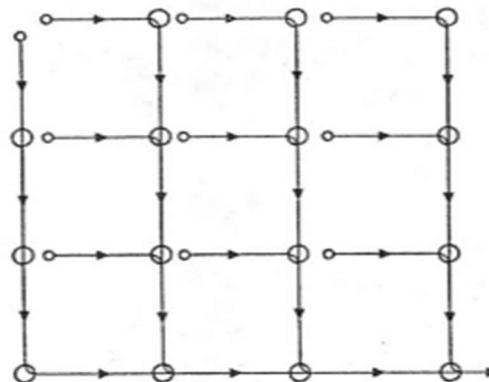
O sistema separador absoluto adota duas redes de coleta totalmente independentes: uma exclusiva para esgotos sanitários (água residuária e infiltrações) e outra destinada exclusivamente ao transporte de águas pluviais. Essa configuração é a mais recomendada para áreas urbanas com maior densidade populacional, pois permite um controle mais eficiente da carga afluente à ETE e previne a sobrecarga hidráulica do sistema (Sobrinho; Tsutiya, 2000).

3.3.2. Configuração das Redes Coletoras: Rede Simples e Rede Dupla

A configuração física da rede coletora influencia diretamente o desempenho hidráulico, a facilidade de manutenção e a viabilidade técnica da implantação do sistema. O traçado deve ser compatível com as características topográficas da via, densidade urbana, tipo de ocupação e disposição dos imóveis. A seguir, apresentam-se os principais tipos de configuração utilizados:

- **Rede Simples:** Corresponde a uma única tubulação instalada ao longo das vias públicas, como apresentado na Figura 3.3, que recebe exclusivamente o esgoto sanitário. Essa configuração é típica de áreas atendidas por sistemas separadores absolutos. Sua concepção hidráulica deve levar em conta as vazões máximas, os declives mínimos e o critério de autolimpeza, evitando sedimentações.

Figura 3.3 - Rede Simples

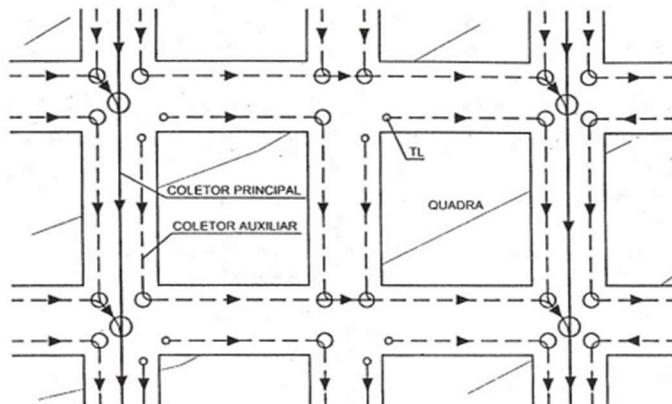


Fonte: Sobrinho; Tsutiya, 2000

- **Rede Dupla:** Em alguns casos, especialmente em ruas muito largas ou de grande extensão transversal, pode ser necessária a instalação de uma rede dupla de esgoto, ou seja, duas linhas paralelas de esgotamento sanitário na mesma via, como ilustrado na Figura 3.4. Essa configuração visa garantir o adequado escoamento dos efluentes e facilitar a conexão dos ramais prediais, evitando longos trechos laterais.

A definição de rede dupla, no contexto de Sistemas de Esgotamento Sanitário (SES), refere-se exclusivamente à presença de duas tubulações de esgoto sanitário instaladas na mesma via, geralmente implantadas em lados opostos da rua, com a finalidade de minimizar cruzamentos, reduzir o comprimento dos ramais prediais e otimizar o traçado da rede. Essa conceituação não deve ser confundida com a coexistência de tubulações de esgoto sanitário e drenagem pluvial na mesma via, situação relacionada à escolha do tipo de sistema adotado (separador absoluto, unitário ou misto) e ao consequente posicionamento das tubulações no eixo carroçável. Assim, a noção de rede dupla é inerente ao traçado sanitário e não ao tipo de sistema hidráulico presente na via.

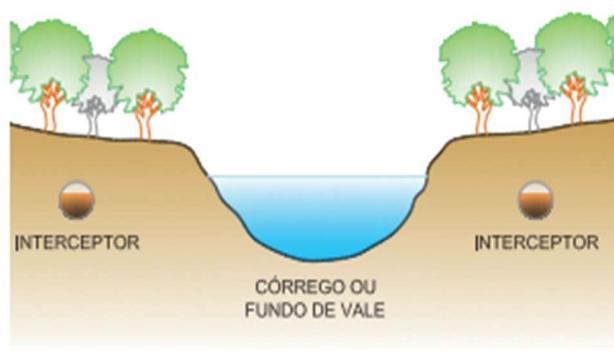
Figura 3.4 - Rede Dupla



Fonte: Sobrinho; Tsutiya, 2000

Interceptores: Canalizações que percorrem fundos de vale, como apresentadas na Figura 3.5 recebendo os esgotos de diversos coletores troncos ao longo de seu comprimento. Não recebem ligações prediais diretas e têm a função de evitar o lançamento de esgotos *in natura* em corpos d'água. Normalmente possuem maior diâmetro em função da elevada vazão que transportam (FUNASA, 2019).

Figura 3.5 - Interceptor



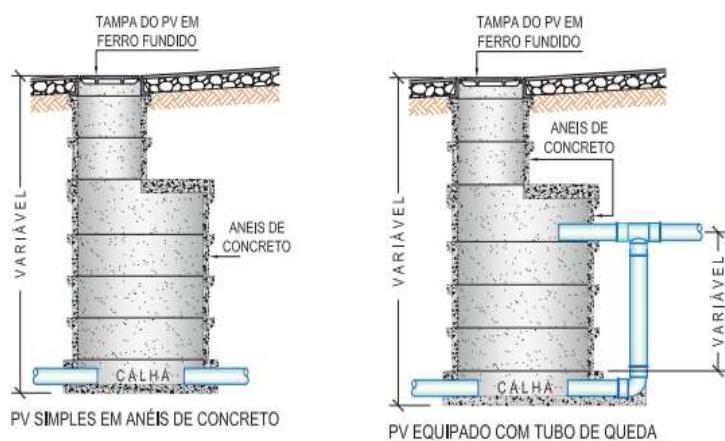
Fonte: FUNASA,2019

3.3.3. Elementos e Acessórios da Rede Coletora

Para garantir o bom desempenho operacional e a facilidade de manutenção da rede, é imprescindível a utilização de dispositivos acessórios, como:

- Poços de Visita (PV): Estruturas de inspeção implantadas ao longo da rede coletora, geralmente em pontos de mudança de direção, cotas ou ramificações, como apresentadas na Figura 3.6. Os PVs permitem a limpeza, desobstrução e monitoramento da rede, além de facilitarem futuras ampliações.

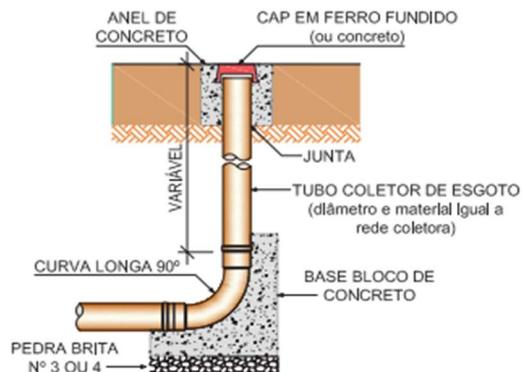
Figura 3.6 - Poço de Visita



Fonte: FUNASA,2019

- Terminal de Inspeção e Limpeza (TIL): Também denominado Terminal de Limpeza (TL), é um dispositivo utilizado para a introdução de equipamentos de inspeção e limpeza da rede coletora. Diferentemente dos poços de visita (PVs), os TILs não são visitáveis, ou seja, não permitem a entrada de pessoas como apresentado na Figura 3.7. Embora na literatura o TL seja frequentemente tratado como equivalente ao TIL, há distinções funcionais: o TIL permite verificar o fluxo do esgoto e possibilita ligação com mais de uma tubulação, enquanto o TL geralmente não possibilita essa verificação. Além disso, o TIL é indicado preferencialmente para o início da linha (ponta seca), e não no final, permitindo acesso e manutenção a jusante. Conforme a FUNASA (2019), o TIL é recomendado como alternativa aos PVs em pontos específicos, especialmente onde a implantação destes não é tecnicamente viável, como no início dos coletores.

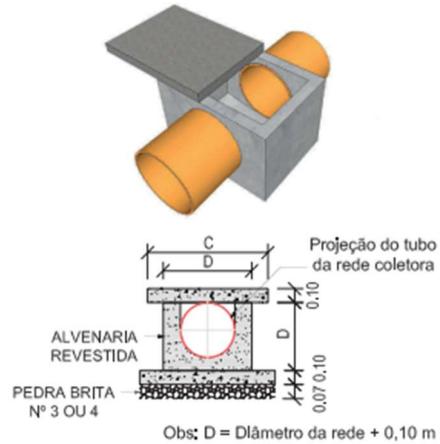
Figura 3.7 - Terminal de Limpeza



Fonte: FUNASA,2019

- Caixa de Passagem (CP): Câmara subterrânea sem acesso interno, como demonstrada na Figura 3.8, utilizada para acomodar variações no traçado da rede, como mudanças de direção, cota ou material das tubulações. Sua adoção é justificada por critérios construtivos ou econômicos (FUNASA, 2019).

Figura 3.8 - Caixa de Passagem

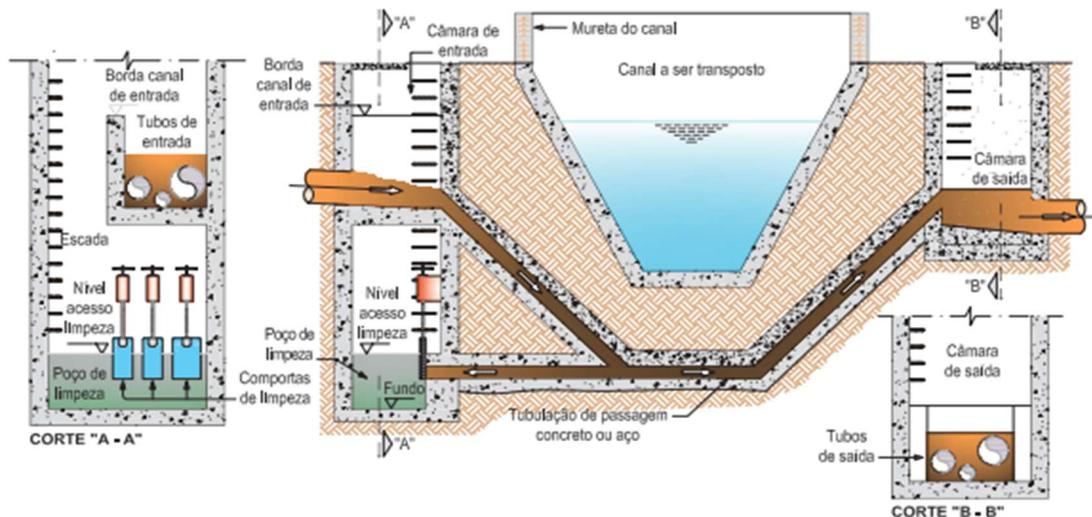


Fonte: FUNASA,2019

- Ligações Prediais: Conexões que interligam os imóveis à rede pública de esgoto. Devem ser executadas de forma adequada, respeitando declividades mínimas e materiais especificados.

- Sifões Invertidos: Trechos da tubulação projetados para transpor obstáculos como cursos d'água ou depressões de terreno, como apresentado na Figura 3.9. O sifão invertido é um trecho rebaixado da rede, funcionando como conduto forçado. (FUNASA, 2019).

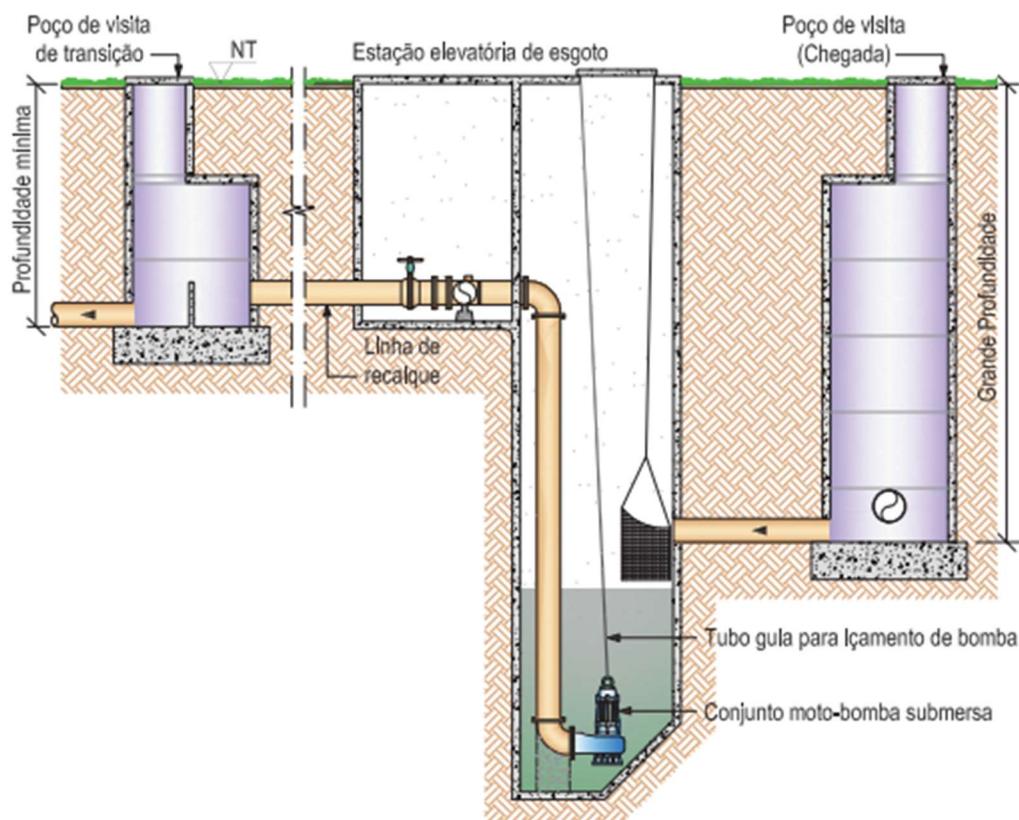
Figura 3.9 - Sifões Invertidos



Fonte: FUNASA,2019

- Estação Elevatória de Esgotos (EEE): Instalação responsável por bombear o esgoto de uma cota mais baixa para outra mais elevada, permitindo a continuidade do transporte por gravidade, como demonstrado na Figura 3.10. De acordo com Alem Sobrinho e Tsutiya (2000), o dimensionamento dessas unidades deve considerar parâmetros como vazão, altura manométrica total, tipo de bomba e frequência de operação.

Figura 3.10 - Elevatória de Esgoto



Fonte: FUNASA,2019

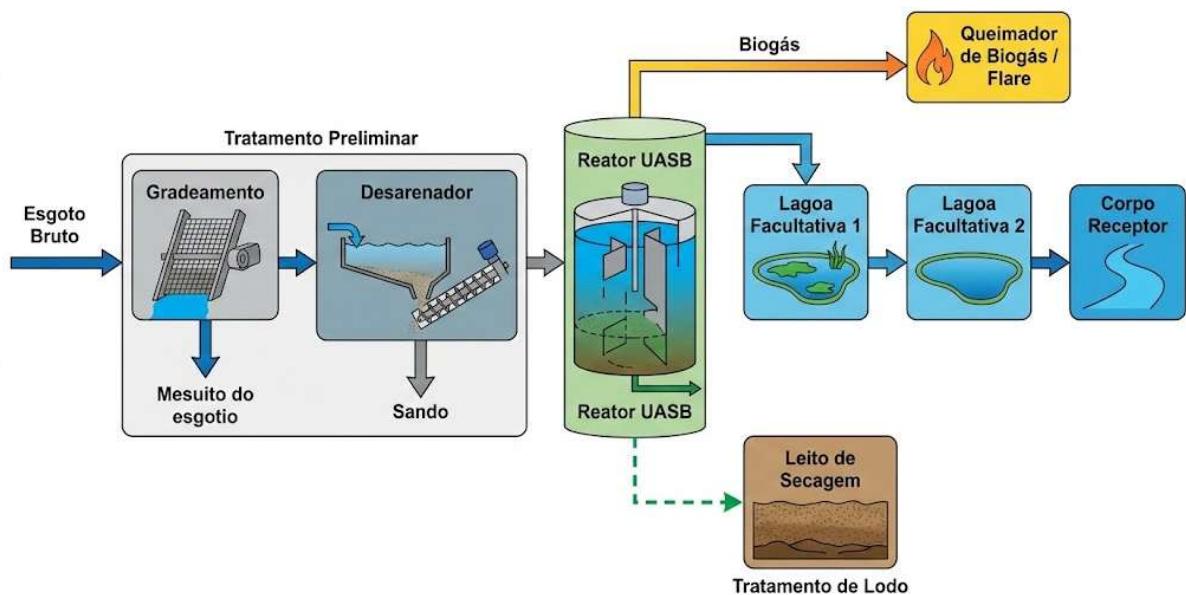
- ETE: Conjunto de unidades operacionais destinadas à remoção de poluentes presentes nos esgotos, visando atender aos padrões de qualidade exigidos para o lançamento em corpos d'água ou para eventual reúso (FUNASA, 2019; Sobrinho; Tsutiya, 2000).
- Disposição Final: Etapa em que o efluente, tratado ou não, é lançado em corpos receptores (rios, córregos, lagos) ou aplicado ao solo, podendo também ser direcionado a sistemas de reúso agrícola ou urbano. Essa etapa deve atender aos critérios ambientais estabelecidos (FUNASA, 2019).
- Corpo Receptor: Curso ou massa de água que recebe os efluentes tratados. A escolha do corpo receptor deve considerar a capacidade de assimilação e as legislações ambientais vigentes (FUNASA, 2019).

3.4. Tecnologias de tratamento de esgoto

O tratamento de esgotos tem como objetivo central a remoção ou transformação dos poluentes presentes nas águas residuárias, de modo a permitir o lançamento seguro do efluente tratado no meio ambiente e evitar impactos negativos sobre os corpos hídricos receptores. De acordo com von Sperling (1996), o tratamento é estruturado em etapas sequenciais, denominadas tratamento preliminar, primário, secundário e terciário, que se complementam para garantir níveis progressivos de purificação da água.

Cada etapa do tratamento cumpre uma função específica e está diretamente relacionada às características físicas, químicas e biológicas do esgoto. O projeto de uma ETE deve considerar esses estágios de forma integrada, buscando o equilíbrio entre eficiência, simplicidade operacional e custo-benefício, especialmente em municípios de pequeno porte, onde os recursos técnicos e financeiros são limitados, bem como ilustrado pela Figura 3.11.

Figura 3.11 -Fluxograma Etapas do Tratamento Proposto



Fonte: O autor, 2025

Conforme representado no fluxograma, o processo tem início no tratamento preliminar, composto por operações físicas que removem sólidos grosseiros e materiais inertes, assegurando a proteção das unidades seguintes. Em seguida, o esgoto passa pelo tratamento primário, no qual ocorre a sedimentação de sólidos sedimentáveis e a formação do lodo primário. O tratamento secundário, considerado a etapa central, promove a degradação

biológica da matéria orgânica dissolvida por meio de processos aeróbios ou anaeróbios. Quando necessário, aplica-se o tratamento terciário, destinado à remoção de poluentes específicos, como nutrientes, seguido da desinfecção, que garante a qualidade sanitária do efluente final para lançamento em corpo hídrico.

Outro fator de grande relevância é a vulnerabilidade ambiental. Segundo Matos (2017), a proximidade de áreas de preservação permanente (APPs), nascentes, igarapés e cursos d'água em geral, demanda uma ação rápida e eficiente para evitar a contaminação dos recursos hídricos. A poluição difusa causada pelo lançamento irregular de esgoto pode comprometer a qualidade da água e afetar toda a bacia hidrográfica.

Além dos aspectos ambientais e populacionais, a viabilidade técnica e operacional é outro critério fundamental. Hanai e Campos (2007) ressaltam que a topografia da região influencia diretamente na escolha do sistema a ser implantado, priorizando-se locais que favoreçam o escoamento por gravidade, reduzindo a necessidade de estações elevatórias e, consequentemente, os custos de operação e manutenção.

Por fim, fatores econômicos e de disponibilidade orçamentária também são considerados na priorização. Regiões que já possuem levantamento topográfico, estudos preliminares e maior facilidade de desapropriação tendem a apresentar menores custos de implantação, sendo mais atrativas do ponto de vista da gestão pública (Santos, 2022).

3.4.1. Estágios de Tratamento

O tratamento preliminar é a primeira barreira de proteção das unidades subsequentes, tendo como principal finalidade a remoção de sólidos grosseiros, areias e materiais flutuantes. Essa etapa previne entupimentos, abrasões e danos mecânicos em bombas, tubulações e equipamentos, além de reduzir a sobrecarga nos processos biológicos. As unidades mais comuns incluem o gradeamento, responsável pela retenção de trapos, plásticos e outros sólidos volumosos, e o desarenador, destinado à sedimentação de partículas minerais mais pesadas, como areia e cascalho, que podem causar desgaste nos componentes da ETE (von Sperling, 1996).

O tratamento primário, por sua vez, baseia-se em processos físicos de sedimentação por gravidade, realizados nos decantadores primários. Essa unidade tem papel importante na redução da carga orgânica que chega ao tratamento biológico, removendo entre 25% e 40% da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e 40% a 60% dos Sólidos Suspensos (SS) do afluente. O dimensionamento da decantação primária utiliza a taxa de aplicação superficial (TAS) como parâmetro de projeto, garantindo que o tempo de detenção seja suficiente para a sedimentação das partículas sem comprometer a estabilidade hidráulica do sistema (von Sperling, 2002).

Já o tratamento secundário representa o coração biológico do processo de depuração, sendo responsável pela oxidação e estabilização da matéria orgânica biodegradável. Nessa etapa, microrganismos consomem a matéria orgânica presente na água resíduária, convertendo-a em dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O) e biomassa microbiana. Segundo Chernicharo (1997), a eficiência dessa etapa depende de fatores como temperatura, concentração de substrato, tempo de detenção hidráulica e idade do lodo, além da relação entre sólidos suspensos voláteis (SSV) e DBO. O tratamento secundário pode ser realizado por sistemas aeróbios, como lodos ativados e lagoas facultativas, ou anaeróbios, como reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*).

Por fim, o tratamento terciário é aplicado quando há necessidade de remoção complementar de nutrientes (nitrogênio e fósforo) ou desinfecção do efluente, visando atender a padrões mais rigorosos de qualidade. Essa etapa é fundamental em áreas de proteção de mananciais ou onde o corpo receptor apresenta baixa capacidade de diluição. Entre as técnicas empregadas destacam-se a filtração, precipitação química, processos de membranas e desinfecção por cloro ou radiação ultravioleta (UV).

3.4.2. *Reatores Anaeróbios: UASB*

Os reatores UASB ocupam posição central no tratamento de esgoto sanitário no Brasil devido à boa adaptação às condições climáticas, à simplicidade operacional e ao baixo consumo energético. O processo ocorre integralmente em ambiente anaeróbio, no qual a matéria orgânica é degradada por uma comunidade microbiana complexa, resultando, principalmente, na formação de metano e dióxido de carbono. A eficiência do reator UASB está intimamente ligada à manutenção da manta de lodo, composta por grânulos densos que promovem elevada

retenção de biomassa e contato contínuo entre o afluente e os microrganismos responsáveis pela digestão.

A configuração interna do reator é constituída por duas zonas principais: o compartimento de digestão (inferior) e a zona de decantação (superior). Entre eles, o separador trifásico atua como o dispositivo físico que permite a condução ordenada das etapas de degradação e sedimentação. A zona de digestão concentra a biomassa ativa, enquanto o compartimento de decantação retém partículas arrastadas; o separador trifásico, por sua vez, garante a adequada segregação entre biogás, sólidos e líquido, impedindo a perda de sólidos biológicos. Essa organização confere ao reator UASB a capacidade de atuar simultaneamente como decantador primário, reator biológico e digestor, característica amplamente destacada pela literatura e confirmada em estudos em escala plena.

Entretanto, como ressaltado por Gonçalves (2015) em sua avaliação detalhada da operação da ETE Laboreaux, o desempenho real dos reatores depende fortemente do manejo adequado do lodo. O acúmulo excessivo de sólidos no interior do reator, especialmente nas regiões superiores próximas ao compartimento de decantação, pode resultar em arraste de partículas e deterioração da qualidade do efluente, com aumento de SST, SSed e DQO. O autor demonstra que, em condições de acúmulo significativo, o lodo pode atingir concentrações capazes de invadir a zona de decantação, comprometendo o processo de clarificação e ampliando a perda de sólidos. Dessa forma, embora o reator UASB seja uma tecnologia robusta, seu desempenho está condicionado a boas práticas de manejo da biomassa, ao controle hidráulico e à integração com uma etapa eficiente de pós-tratamento. A conjugação adequada entre essas ações permite que os reatores atinjam níveis de remoção compatíveis com as exigências ambientais, mantendo a atratividade da tecnologia para municípios de pequeno e médio porte.

3.4.3. Lagoas de Estabilização

Os sistemas de lagoas de estabilização representam uma das formas mais simples e consolidadas de tratamento de esgotos. Segundo Von Sperling (1995), essas unidades são especialmente adequadas ao contexto brasileiro, devido à ampla disponibilidade de área, às condições climáticas favoráveis (com temperaturas e radiação solar elevadas) e à simplicidade de operação, que reduz a necessidade de equipamentos complexos.

Dentre as variantes existentes, a lagoa facultativa é considerada a configuração mais básica. Nesse tipo de unidade, a fração particulada da matéria orgânica sedimenta, formando o lodo de fundo onde ocorre a degradação por microrganismos anaeróbios. Já a fração solúvel da matéria orgânica é oxidada na camada superficial por meio da respiração aeróbia, sendo o oxigênio majoritariamente suprido pela atividade fotossintética das algas (von Sperling, 1995). Uma característica marcante do efluente dessas lagoas é a coloração esverdeada, decorrente da elevada concentração de algas em suspensão.

A dependência da atividade biológica em relação à temperatura levou ao desenvolvimento de tipologias mais complexas, voltadas à otimização do processo e redução da área necessária. Uma alternativa bastante difundida é o sistema constituído por lagoa anaeróbia seguida de lagoa facultativa, no qual a primeira unidade, mais profunda e submetida a maior carga orgânica, promove uma estabilização inicial da ordem de 50% da DBO_5 , reduzindo a área total em até dois terços em relação a uma lagoa facultativa isolada (von Sperling, 1995). Para o bom funcionamento, é imprescindível que a lagoa opere sob condições estritamente anaeróbias, favorecendo a atividade de bactérias metanogênicas.

Outra variação corresponde às lagoas aeradas facultativas, que utilizam aeradores mecânicos como fonte de oxigenação, complementando ou substituindo o aporte oriundo da fotossíntese. Embora parte dos sólidos permaneça dispersa no meio líquido, uma fração se deposita no fundo, onde ocorre a digestão anaeróbia. Já as lagoas aeradas de mistura completa operam com maior densidade de potência, garantindo completa dispersão dos sólidos e, consequentemente, maior eficiência na remoção de DBO . Entretanto, esse arranjo resulta em efluentes com elevadas concentrações de sólidos em suspensão, exigindo uma etapa complementar de decantação (von Sperling, 1995).

3.4.4. Lodos Ativados

O processo de lodos ativados é um sistema biológico aeróbio amplamente utilizado no tratamento de esgotos domésticos e industriais, tendo como princípio fundamental a degradação da matéria orgânica por uma biomassa em suspensão. No reator aerado, os microrganismos utilizam a matéria carbonácea como fonte de energia e crescimento, promovendo sua estabilização por meio de reações bioquímicas intensificadas pela contínua oferta de oxigênio.

A aeração desempenha papel essencial no processo, não apenas fornecendo oxigênio dissolvido, mas também garantindo a mistura completa do meio e o contato eficiente entre substrato e biomassa (von Sperling, 2002).

Após a oxidação da matéria orgânica no reator, a mistura líquida segue para o decantador secundário, unidade responsável pela separação sólido-líquido. Nesse tanque, o lodo sedimenta, produzindo um efluente clarificado com baixa concentração de sólidos suspensos. A maior parte do lodo sedimentado é recirculada ao reator, assegurando a manutenção da biomassa ativa em quantidades suficientes para o tratamento. Já o excedente de lodo é removido do sistema para evitar seu acúmulo, garantindo estabilidade operacional e boa qualidade do efluente final (von Sperling, 2002).

O desempenho do processo está intimamente relacionado ao comportamento da biomassa, que é influenciado por fatores como composição do esgoto, temperatura, características de sedimentação e condições operacionais. A sedimentabilidade do lodo é particularmente importante, pois afeta diretamente a eficiência do decantador e a claridade do efluente. Problemas como lodo filamentoso, espuma e má sedimentação podem comprometer o funcionamento do sistema, exigindo monitoramento contínuo e ajustes operacionais (von Sperling, 2002).

A tecnologia de lodos ativados apresenta diferentes configurações, que podem ser selecionadas conforme os objetivos de tratamento, disponibilidade de área e complexidade operacional desejada. Entre as principais variantes incluem-se:

- Lodo ativado convencional, caracterizado por reatores aerados seguidos de decantação, com recirculação contínua do lodo;
- Aeração prolongada, que trabalha com maiores idades de lodo e promove estabilização biológica mais completa;
- Reatores por batelada sequencial (SBR), nos quais as etapas de enchimento, aeração, sedimentação e descarga ocorrem no mesmo tanque, de forma cíclica;
- Sistemas de remoção biológica de nutrientes (BNR), projetados para promover nitrificação, desnitrificação e remoção biológica de fósforo além da remoção de matéria orgânica (von Sperling, 2002).

De maneira geral, trata-se de um processo robusto, flexível e capaz de atender a rigorosos padrões de lançamento, sendo amplamente consolidado e estudado na literatura. Quando adequadamente operado, o sistema de lodos ativados garante elevada eficiência na remoção de matéria orgânica e sólidos, além de permitir a inclusão de etapas adicionais para tratamento de nutrientes, consolidando-se como uma das tecnologias mais versáteis e eficientes no contexto do tratamento de águas residuárias (von Sperling, 2002).

3.5. Critérios normativos e ambientais

3.5.1. Resolução CONAMA Nº 357/2005

A Resolução CONAMA Nº 357/2005 reside no reconhecimento de que a água é fundamental para o desenvolvimento sustentável, o equilíbrio ecológico e a saúde humana. A norma proíbe o lançamento de poluentes em níveis perigosos ou nocivos aos seres humanos e a outras formas de vida, conforme previsto na Constituição Federal e na Lei nº 6.938/1981.

a. Classificação e Enquadramento dos Corpos de Água

A resolução classifica as águas doces, salobras e salinas do Território Nacional em treze classes de qualidade, definidas em função dos seus usos preponderantes, atuais ou futuros. O enquadramento consiste em estabelecer a meta de qualidade (classe) que um determinado segmento do corpo de água deve, obrigatoriamente, alcançar ou manter ao longo do tempo. É um processo estratégico que busca a qualidade ideal da água para atender às necessidades da comunidade, não se limitando ao seu estado atual.

Para as águas doces, as classes são:

Classe Especial: Destinada ao abastecimento para consumo humano (com desinfecção), à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas e à preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral. Nestas águas, as condições naturais devem ser mantidas.

Classe 1: Permite o abastecimento para consumo humano após tratamento simplificado, recreação de contato primário (como natação e mergulho), e irrigação de hortaliças e frutas consumidas cruas, entre outros usos.

Classe 2: Permite o abastecimento para consumo humano após tratamento convencional, recreação de contato primário, aquicultura e pesca.

Classe 3: Destinada a usos mais flexíveis, como abastecimento após tratamento convencional ou avançado, irrigação de culturas arbóreas e dessedentação de animais.

Classe 4: Destinada à navegação e harmonia paisagística.

A norma também estabelece classificações para águas salinas (Classe Especial, Classe 1, Classe 2 e Classe 3) e águas salobras (Classe Especial, Classe 1, Classe 2 e Classe 3), detalhando os usos permitidos e os padrões de qualidade específicos para cada uma.

3.5.2. Resolução CONAMA Nº 430/2011

A Resolução CONAMA Nº 430, de 13 de maio de 2011, representa uma importante atualização na legislação ambiental brasileira, pois dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, e, ao mesmo tempo, complementa e altera a Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Publicada no Diário Oficial da União em 16 de maio de 2011, esta norma é um instrumento de gestão que visa proteger os corpos de água receptores, garantindo que a qualidade da água e seus usos previstos na classificação sejam preservados.

A resolução revogou diversos artigos da Resolução CONAMA nº 357/2005, notadamente aqueles relacionados às disposições gerais sobre lançamento de efluentes (arts. 24 a 37), bem como as disposições finais e transitórias que tratavam do tema (arts. 39, 43, 44 e 46), e a definição de "zona de mistura" (inciso XXXVIII do art. 2º).

a. Condições e Padrões de Lançamento de Efluentes

A Resolução CONAMA Nº 430/2011 reafirma que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente podem ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta e em outras normas aplicáveis. O órgão ambiental competente pode adicionar condições ou padrões mais restritivos, e exigir a tecnologia ambientalmente adequada e economicamente viável.

Condições e Padrões Gerais de Lançamento (Art. 16):

Os efluentes devem obedecer às seguintes condições, entre outras:

- pH entre 5 a 9.
- Temperatura inferior a 40° C, com a variação de temperatura do corpo receptor não excedendo 3° C no limite da zona de mistura.
- Materiais sedimentáveis de, no máximo, 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Imhoff. Para lagos e lagoas, devem estar virtualmente ausentes.
- Óleos e graxas com limites de até 20 mg/L para óleos minerais e até 50 mg/L para óleos vegetais e gorduras animais.
- Ausência de materiais flutuantes.
- Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias a 20° C): remoção mínima de 60% de DBO, a não ser que um estudo de autodepuração comprove o atendimento às metas de enquadramento do corpo receptor.

A Tabela I (Art. 16, inciso II) define os valores máximos para diversos parâmetros inorgânicos (como Arsênio, Cádmio, Chumbo, Cromo e Mercúrio) e orgânicos (como Benzeno, Clorofórmio e Fenóis totais) nos efluentes.

b. Proteção do Corpo Receptor e Ecotoxicidade

A norma estabelece uma relação direta entre o lançamento de efluentes e o enquadramento do corpo receptor, determinando que os efluentes não podem conferir ao corpo receptor características de qualidade em desacordo com as metas obrigatórias progressivas.

- O tratamento da ecotoxicidade foi aprofundado na resolução:
- O efluente não deve causar ou possuir potencial para causar efeitos tóxicos aos organismos aquáticos no corpo receptor.
- Os critérios para avaliar o efeito tóxico devem se basear em resultados de ensaios ecotoxicológicos utilizando organismos aquáticos de pelo menos dois níveis tróficos diferentes.
- A Concentração do Efluente no Corpo Receptor (CECR), calculada com base nas vazões de referência, deve ser menor ou igual à Concentração de Efeito Não Observado (CENO) ou, para testes agudos, deve atender a critérios definidos em relação à Concentração Letal Mediana (CL50) ou ao Fator de Toxicidade (FT), variando

conforme a classe do corpo receptor (Classes 1 e 2 de água doce e Classe 1 de água salina/salobra; ou Classe 3 de água doce e Classe 2 de água salina/salobra).

- O lançamento de Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) é vedado, e deve ser utilizada tecnologia para reduzir e eliminar a formação de dioxinas e furanos.

c. Disposições Específicas e de Gestão

Efluentes de Esgotos Sanitários (Art. 21): O lançamento direto de efluentes de esgotos sanitários deve seguir condições específicas, como um limite máximo de 120 mg/L para DBO (com a possibilidade de ser ultrapassado se comprovada a eficiência mínima de remoção de 60%) e substâncias solúveis em hexano (óleos e graxas) de até 100 mg/L.

- Emissários Submarinos: Os efluentes lançados por emissários submarinos devem atender aos padrões da classe do corpo receptor após a zona de mistura e ao padrão de balneabilidade.
- Vedaçāo de Diluição: É vedada a mistura de efluentes com águas de melhor qualidade para fins de diluição antes do lançamento.
- Carga Poluidora e Capacidade de Suporte: O órgão ambiental deve estabelecer a carga poluidora máxima do efluente e pode exigir um estudo de capacidade de suporte do corpo receptor, que deve considerar a diferença entre os padrões da classe e as concentrações a montante.
- Declaração de Carga Poluidora (Art. 28): As fontes poluidoras devem apresentar anualmente, até 31 de março, a Declaração de Carga Poluidora, que caracteriza qualitativa e quantitativamente os efluentes.
- Automonitoramento e Reutilização: As fontes poluidoras devem realizar o automonitoramento e buscar ativamente práticas de gestão para redução da geração e melhoria da qualidade dos efluentes, e proceder à reutilização sempre que possível. A Resolução CONAMA Nº 357, de 17 de março de 2005, é um marco na legislação ambiental brasileira, pois dispõe sobre a classificação dos corpos de água e estabelece as diretrizes ambientais para o seu enquadramento, além de fixar as condições e padrões de lançamento de efluentes. Publicada no Diário Oficial da União em 18 de março de 2005, e posteriormente alterada pelas Resoluções nº 410/2009 e nº 430/2011, esta norma

do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) tem como principal objetivo assegurar os usos preponderantes da água, protegendo a sua qualidade

3.5.3. Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG Nº 8

A Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG nº 8/2022 é atualmente o principal marco regulatório de Minas Gerais para a gestão da qualidade da água, abrangendo a classificação dos corpos hídricos, as diretrizes de enquadramento e os padrões para lançamento de efluentes. Publicada em dezembro de 2022, a norma substituiu a DN nº 01/2008 e passou a ser aplicada a todas as águas doces do estado.

Um dos principais avanços introduzidos pela DN é a incorporação da integridade ecológica ao processo de classificação, complementando a abordagem tradicional baseada apenas nos usos preponderantes. Assim, a qualidade dos ambientes aquáticos passa a ser avaliada também por meio de indicadores biológicos, como invertebrados bentônicos e ictiofauna, além de características eco hidromorfológicas dos habitats, comparadas a sítios de referência. Para classes mais rigorosas, como a Classe 1, a norma exige a ausência de efeitos tóxicos agudos ou crônicos à biota e de bioacumulação de elementos-traço ou compostos orgânicos.

Quanto ao lançamento de efluentes, a DN determina que somente podem ser lançados após tratamento adequado e dentro dos limites estabelecidos, vedando o lançamento em águas de Classe Especial e proibindo a diluição prévia com águas de melhor qualidade. Também reforça o controle da ecotoxicidade, proibindo que o efluente cause efeitos tóxicos no corpo receptor e vedando o lançamento de POPs.

Os principais padrões de lançamento incluem: pH entre 5,0 e 9,0; temperatura inferior a 40°C; limites específicos para DBO (com exigências diferenciadas para efluentes domésticos e lixiviados de aterros), DQO, óleos e graxas, além da obrigatoriedade de atender a limites para Nitrogênio Amoniacal Total nos esgotos sanitários, com prazos de adequação de 5 a 7 anos.

Do ponto de vista de gestão, a norma estabelece que o órgão ambiental deve definir a capacidade de suporte do corpo d'água e a carga poluidora máxima admissível para cada lançamento. Também torna obrigatória a apresentação anual da Declaração de Carga Poluidora (DCP) e o automonitoramento contínuo pelos empreendimentos.

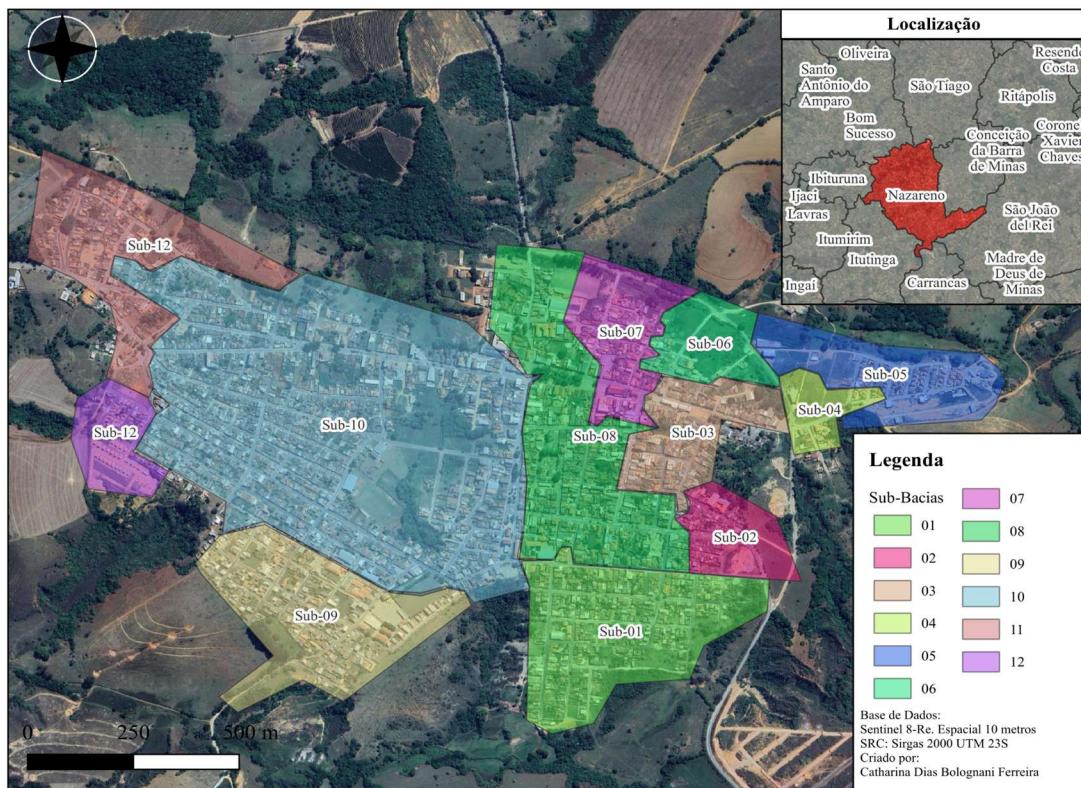
De forma geral, a DN nº 8/2022 consolida um arcabouço mais rigoroso e abrangente para a proteção dos recursos hídricos em Minas Gerais, ao alinhar padrões físico-químicos, critérios ecotoxicológicos e indicadores ecológicos. A norma orienta o licenciamento, a fiscalização e o monitoramento da qualidade das águas, e serve de referência para comparações entre os padrões estaduais e federais.

4. METODOLOGIA

Para a avaliação da rede de esgoto já existente e implantada no município de Nazareno/MG, o Memorial Descritivo e Justificativo, integrante do Produto 2.0 (Diagnóstico Técnico-Participativo) elaborado pela Fundação Gorceix (2023) no âmbito do Plano Municipal de Saneamento Básico, representa a principal fonte técnica de referência. O documento fornece uma descrição detalhada da configuração atual do sistema, com informações fundamentais sobre a extensão, localização e funcionalidade das redes coletoras e dos interceptores implantados. Essas informações são essenciais para a caracterização da infraestrutura sanitária em operação e para a identificação das áreas que permanecem desatendidas ou parcialmente cobertas.

A organização do sistema de esgotamento sanitário foi realizada com base na divisão da área urbana em doze sub-bacias de contribuição. Essa subdivisão permitiu um planejamento setorizado da coleta de esgotos, facilitando tanto o dimensionamento técnico quanto a execução das obras por etapas, conforme a disponibilidade orçamentária e a urgência de atendimento em determinadas regiões da cidade. Cada sub-bacia foi definida com base em critérios topográficos, hidrológicos e de ocupação do solo, sendo que cada uma corresponde a um conjunto de logradouros cujos efluentes convergem para um mesmo ponto de coleta ou interceptor tronco, como apresentado na Figura 4.1.

Figura 4.1 - Sub-Bacias de Implantação



Fonte: O autor.

A divisão em sub-bacias, conforme adotada no projeto, viabilizou uma análise segmentada da cobertura atual do sistema, permitindo a comparação entre os setores já atendidos e aqueles em processo de planejamento. Além disso, a abordagem por sub-bacias facilita o monitoramento técnico, a avaliação da eficiência hidráulica do sistema existente e a proposição de diretrizes para a expansão sustentável do serviço de esgotamento sanitário no município.

Este trabalho foi desenvolvido por meio de uma abordagem quantitativa e técnica, com foco no diagnóstico da situação atual do sistema de esgotamento sanitário no município de Nazareno (MG) e no redimensionamento da rede coletora para atendimento das áreas atualmente desassistidas. A metodologia foi dividida em quatro etapas principais:

4.1. Projeção Populacional

Com o objetivo de estimar a demanda futura por tratamento de efluentes no município de Nazareno, realizou-se a projeção da população a ser atendida ao longo do horizonte de planejamento. Para isso, adotou-se o Método Aritmético, recomendado para estudos de curto prazo e com tendência de crescimento populacional linear, conforme apresentado por Alem Sobrinho e Tsutiya (2000). Esse método pressupõe que a população cresce por incrementos anuais constantes, resultando em um modelo simples e amplamente utilizado em estudos de saneamento quando o comportamento histórico não indica aceleração ou desaceleração significativa do crescimento.

O método baseia-se na hipótese de que a variação da população ao longo do tempo ocorre de maneira constante. Tal suposição é expressa pela Equação 4.1 diferencial apresentada pelos autores:

$$k_a = \frac{dP}{dt} \quad (4.1)$$

Onde: P = população; k_a = constante aritmética de crescimento populacional e t = tempo (em anos) transcorrido desde o ano base.

Para a aplicação prática do método, são utilizados os valores de população dos dois censos mais recentes, representados por P_1 (população do penúltimo censo, no ano t_1) e P_2 (população do último censo, no ano t_2). A partir desses dados, determina-se a constante de k_a , calculada pela Equação 4.2:

$$k_a = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \quad (4.2)$$

Esse parâmetro representa o incremento médio anual da população no período analisado.

Uma vez obtido k_a , procede-se à projeção da população futura no ano de interesse t . Para isso, utiliza-se a Equação 4.3 do Método Aritmético:

$$P_t = P_2 + k_a \times (t - t_2) \quad (4.3)$$

Onde: P_t = população projetada para o ano t ; P_2 = população do último censo; t_2 = ano do último censo e t = tempo (em anos) transcorrido desde o ano base.

A utilização do Método Aritmético permite obter uma estimativa objetiva e coerente com o comportamento demográfico observado nos censos do município. Embora seja tradicionalmente recomendado para horizontes de curto prazo, sua aplicação neste estudo para um horizonte de 30 anos se justifica pela estabilidade histórica do crescimento populacional de Nazareno, que apresenta incrementos absolutos reduzidos e com pouca variação entre as décadas, indicando uma tendência linear. Em municípios de pequeno porte, como é o caso, a dinâmica de expansão urbana e demográfica costuma manter-se estável ao longo do tempo, de modo que métodos que assumem aceleração do crescimento tenderiam a superestimar a população futura, resultando em projetos superdimensionados e economicamente desfavoráveis.

Assim, o Método Aritmético fornece uma projeção conservadora, realista e financeiramente responsável para fins de planejamento em saneamento, garantindo um dimensionamento equilibrado das vazões de contribuição, cargas orgânicas e unidades da ETE de Nazareno (MG) ao longo do horizonte de 25 anos.

4.2. Estimativa de Vazões e Cargas

O cálculo das vazões de esgoto sanitário constitui a etapa fundamental para o dimensionamento da ETE, pois define as condições de projeto que irão orientar o dimensionamento hidráulico e biológico de todas as unidades do sistema. A determinação dessas vazões tem como objetivo estimar o volume de esgoto que será coletado e tratado no horizonte de projeto, considerando as variações de consumo, infiltrações e contribuições singulares que ocorrem ao longo do tempo.

De acordo com a NBR 9648 (ABNT, 1986), a vazão total de esgoto sanitário é obtida pela soma das parcelas doméstica conforme a Equação 4.4:

$$Q_{total} = Q_D + Q_{inf} + Q_{ind} \quad (4.4)$$

A vazão total de esgoto sanitário (Q_{total}) é definida como a soma das contribuições de esgotos domésticos, águas de infiltração e resíduos industriais. A parcela doméstica (Q_D) corresponde aos despejos líquidos resultantes do uso da água para necessidades higiênicas e fisiológicas, enquanto a vazão de infiltração (Q_{inf}) refere-se às águas do subsolo que penetram indevidamente no sistema através das tubulações e órgãos acessórios. Já a vazão industrial (Q_{ind}) representa as descargas concentradas ou singulares provenientes de grandes contribuintes, como indústrias e escolas, que alteram sensivelmente o fluxo da rede.

Essas parcelas representam as diferentes origens do esgoto afluente e devem ser consideradas para garantir que o sistema projetado opere de forma eficiente e segura em todas as condições de contribuição.

A primeira etapa do cálculo consistiu na determinação da vazão doméstica média de final de plano, que corresponde à parcela do esgoto gerada pela população atendida. Segundo Alem Sobrinho e Tsutiya (2000), essa vazão é calculada pela Equação 4.5:

$$Q_{D,f} = \frac{P_f \times Q_{PC,f} \times C}{86400} \quad (4.5)$$

onde: P_f (hab) é a população projetada para o horizonte de final de plano; $Q_{PC,f}$ (L/hab.dia) é o consumo médio per capita de água; C (adimensional) é o coeficiente de retorno, que representa a fração do consumo de água transformada em esgoto e 86400 é o fator de conversão de litros por dia para litros por segundo.

A NBR 9649 (ABNT, 1986) recomenda que o coeficiente de retorno varie entre 0,7 e 0,9, sendo comumente adotado o valor $C = 0,8$.

A vazão de infiltração (Q_{inf}), que representa as contribuições indesejadas de águas subterrâneas e pluviais que penetram na rede coletora, é obtida conforme a mesma norma pela Equação 4.6:

$$Q_{inf,f} = T \times L \quad (4.6)$$

em que T é a taxa de infiltração ($L/s \cdot km$), que varia entre 0,05 e 1,0 $L/s \cdot km$, conforme as condições de estanqueidade da rede e do lençol freático, e L é o comprimento total da rede coletora (km).

Assim, a vazão média total de final de plano $Q_{total,final}$ é dada pela soma das parcelas médias, segundo Alem Sobrinho e Tsutiya (2000), como ilustrado na Equação 4.7:

$$Q_{total,final} = Q_{D,f} + Q_{inf,f} + Q_{ind} \quad (4.7)$$

Em seguida, foram determinadas as vazões extremas de projeto, que representam as condições de máxima e mínima contribuição do sistema.

A vazão máxima de projeto ($Q_{máx,ETE}$) foi utilizada no dimensionamento das unidades que recebem o esgoto bruto, como grades e desarenadores. Conforme Alem Sobrinho e Tsutiya (2000) e a NBR 9649 (ABNT, 1986), essa vazão foi calculada pela aplicação dos coeficientes de variação diária (K_1) e horária (K_2) sobre a vazão doméstica na Equação 4.8:

$$Q_{máx,ETE} = (Q_{D,f} \times K_1 \times K_2) + Q_{inf,f} + Q_{ind} \quad (4.8)$$

Os coeficientes de variação representam as oscilações do consumo ao longo dos dias da semana e horas do dia. A norma recomenda os valores $K_1 = 1,2$ e $K_2 = 1,5$.

Por sua vez, a vazão mínima de projeto ($Q_{mín,ETE}$) foi utilizada para avaliar o desempenho da ETE em períodos de menor contribuição, sendo dada pela Equação 4.9:

$$Q_{mín,ETE} = (Q_{D,f} \times K_3) + Q_{inf,f} + Q_{ind} \quad (4.9)$$

onde K_3 é o coeficiente de mínima vazão horária, com valor recomendado de $K_3 = 0,5$, segundo a NBR 9649 (ABNT, 1986).

4.3. Escolha do Sistema de Tratamento

A determinação dessas vazões (média, máxima e mínima) permitiu definir o regime hidráulico e biológico de funcionamento da ETE, visando a operação de forma estável em todas as condições. A metodologia adotada, fundamentada em Alem Sobrinho e Tsutiya (2000) e nas normas da Lei 12209 de 2011, garante que o dimensionamento atenda aos critérios técnicos, operacionais e normativos exigidos para sistemas de esgotamento sanitário.

A escolha da concepção tecnológica para o tratamento dos esgotos e o estabelecimento de critérios para o seu pré-dimensionamento foram conduzidos com base em uma abordagem metodológica estruturada, fundamentada tanto nas diretrizes normativas vigentes quanto nas contribuições consolidadas da literatura técnico-científica. O objetivo central desta etapa consiste em definir a tecnologia mais compatível com o contexto local do município de Nazareno (MG), estabelecendo parâmetros e justificativas que orientarão os cálculos e dimensionamentos apresentados nas próximas subseções da metodologia.

O embasamento técnico adotado deriva principalmente das contribuições de von Sperling (1996), referência nacional em sistemas por lagoas de estabilização, e da NBR 12.209, que orienta os requisitos de projeto hidráulico-sanitário de estações de tratamento de esgotos. Partindo desses fundamentos, buscou-se selecionar uma solução que conciliasse desempenho de remoção, confiabilidade operacional, sustentabilidade econômica e viabilidade ambiental.

Em termos comparativos, sistemas mecanizados como lagoas aeradas foram considerados apenas como referência, uma vez que demandariam consumo energético contínuo, custos operacionais elevados e maior dependência técnica, não sendo adequados ao cenário analisado. Assim, a opção pelas lagoas ocorre não apenas por viabilidade técnica, mas também por adequação socioeconômica.

Entre as configurações avaliadas, destacaram-se as lagoas facultativas isoladas e o sistema australiano (associação entre lagoa anaeróbia e lagoa facultativa). A adoção da segunda configuração apresenta vantagens operacionais e ambientais, permitindo redução antecipada da carga orgânica via lagoa anaeróbia e estabilização complementar na lagoa facultativa. Essa subdivisão resulta em melhor equilíbrio entre eficiência de remoção, área ocupada e estabilidade hidráulica.

4.4. Critérios de Dimensionamento das Unidades

Os critérios adotados para o dimensionamento seguiram recomendações de von Sperling (1996, 2002, 2020), Chernicharo (1997) e das normas ambientais vigentes, especialmente a Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG nº 8/2022 e a Resolução CONAMA nº 430/2011.

Os parâmetros hidráulicos e orgânicos considerados incluem, como apresentados na **Tabela 4.1**:

Tabela 4.1 - Parâmetros Adotados

| Categoria | Parâmetro | Valor Adotado |
|------------------------|--|-------------------|
| Afluente & Geral | Temperatura Média | 20 a 25 °C |
| | DBO Afluente | 350 mg/L |
| | Eficiência Global Mínima | 85% |
| Reator UASB | Tempo de Detenção Hidráulica (TDH) | 6 a 10 horas |
| | Taxa de Aplicação Superficial (L_s) | 350 kg DBO/ha·dia |
| Lagoa (Pós-Tratamento) | Profundidade Média | 2,0 m |
| | | |

Fonte: O autor.

Esses valores foram selecionados de forma a garantir o equilíbrio entre eficiência, simplicidade construtiva e estabilidade operacional. O tempo de detenção mínima de 6 horas no reator UASB é necessário para prevenir o arraste do lodo e permitir adequada digestão anaeróbia.

A eficiência mínima de 85% foi estabelecida em conformidade com a DN COPAM-CERH/MG nº 8/2022, que define este valor como condição para lançamento de efluentes em corpos d'água de Classe 1, como o Córrego das Almas e o Ribeirão Ananias, receptores potenciais do efluente tratado.

As condições climáticas locais de Nazareno (MG), caracterizadas por temperaturas médias anuais elevadas, favorecem os processos biológicos anaeróbios, justificando o emprego de sistemas UASB e lagoas como combinação ideal de eficiência, baixo custo e simplicidade de operação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A escolha do sistema baseou-se nas características climáticas e operacionais observadas no município. A região apresenta temperaturas médias elevadas e alta incidência solar na maior parte do ano, condições que favorecem a oxigenação superficial e os processos fotossintéticos, os quais são determinantes para o funcionamento eficiente das lagoas de estabilização. Além disso, a tecnologia escolhida apresenta simplicidade operacional, baixa dependência de sistemas eletromecânicos e baixo custo de manutenção, o que a torna coerente com a capacidade gerencial e financeira do município.

5.1. Diagnóstico da Situação Atual

O diagnóstico do sistema de esgotamento sanitário (SES) do município de Nazareno (MG) buscou caracterizar de forma detalhada a situação atual da coleta e disposição de esgotos, identificando deficiências, áreas críticas e riscos ambientais. A análise baseou-se em levantamento documental, estudos prévios, dados secundários de órgãos públicos e consultorias especializadas, incluindo relatórios de Perfil Socioeconômico, Diagnóstico Integrado e relatórios técnicos do Plano Municipal de Saneamento Básico (Práxis, 2022).

A cobertura da rede coletora urbana é relativamente ampla, atingindo aproximadamente 95,1% dos domicílios (Práxis, 2022). No entanto, a coleta não é acompanhada de tratamento adequado: todo o esgoto é lançado *in natura* nos corpos hídricos, sem qualquer processamento, o que representa risco ambiental significativo e contraria normas de qualidade de água (Práxis, 2022). Essa condição evidencia a necessidade de implantação de uma ETE que garanta a conformidade ambiental e a proteção da saúde pública.

A Etapa Útil, correspondente à primeira fase de implantação, contemplou nove sub-bacias urbanas: 01, 02, 03, 05, 06, 07, 08, 10 e 11. Nessas áreas foram implantados aproximadamente 1.094 metros de redes coletoras, interligadas a trechos já existentes, permitindo a condução dos

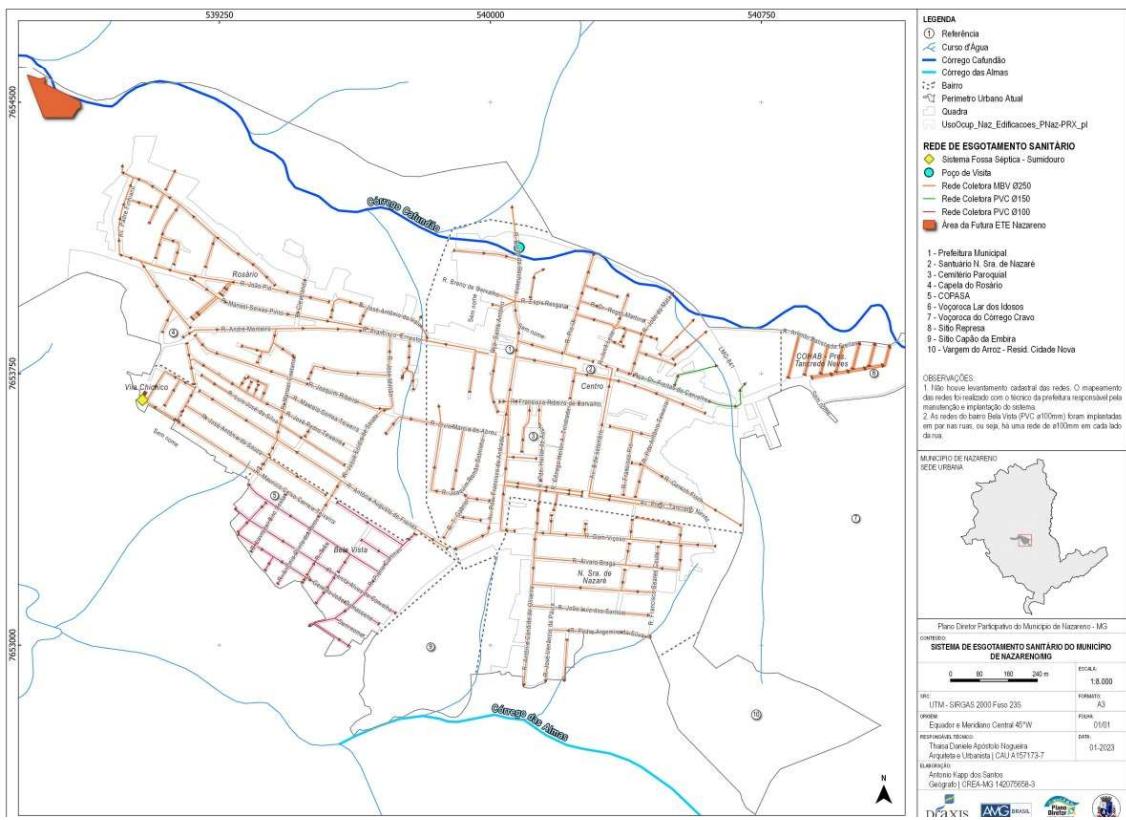
esgotos até os interceptores principais. Esses interceptores, Cafundão (margens direita e esquerda) e Nazareno (margem esquerda), totalizam 3.049 metros lineares e foram concebidos para receber os efluentes provenientes das redes locais e conduzi-los até o ponto de lançamento temporário, em virtude da ausência, até o momento, de unidades de tratamento em operação.

Por outro lado, as sub-bacias 04, 09 e 12 ainda não foram contempladas com redes coletoras, estando previstas para implantação nas etapas futuras do plano. Parte da sub-bacia 11, embora parcialmente atendida, também será objeto de ampliação da rede. Para essas regiões, o projeto prevê não apenas a execução de novas redes e a expansão da capacidade de interceptação, mas também a implantação das unidades de tratamento definitivas, incluindo a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE-01) e estações descentralizadas (ETE-02 e ETE-03), de acordo com o modelo de atendimento mais adequado a cada área.

A infraestrutura existente apresenta graves limitações. A rede coletora foi implantada sem dimensionamento hidráulico adequado, o que compromete a eficiência e a durabilidade do sistema. Elementos essenciais para operação e manutenção, como poços de visita, TIL e TL, estão ausentes em diversos trechos, aumentando o custo operacional e dificultando eventuais intervenções corretivas (Práxis, 2022). Quanto à composição da malha, a rede é formada principalmente por manilha de barro vidrado (MBV), com trechos isolados em PVC, o que, além de dificultar a padronização, contribui para problemas de infiltração e extravasamento (Práxis, 2022).

A **Figure 5.2** apresenta a estrutura atual da rede coletora de esgoto na sede urbana. As linhas em laranja e rosa representam os diâmetros e materiais distintos utilizados na rede, revelando a heterogeneidade dos sistemas implantados ao longo dos anos. Trechos em PVC convivem com extensões em manilha (MBV), o que reforça a falta de padronização citada no texto. Observa-se também a delimitação de áreas ainda não atendidas, como setores do bairro Bela Vista, e locais críticos próximos a cursos d’água. A figura evidencia ainda a ausência de ETE operante, representada apenas como “área da futura ETE”, reforçando que todo o esgoto coletado segue atualmente para lançamento direto no meio ambiente.

Figure 5.1 - Rede Coletora

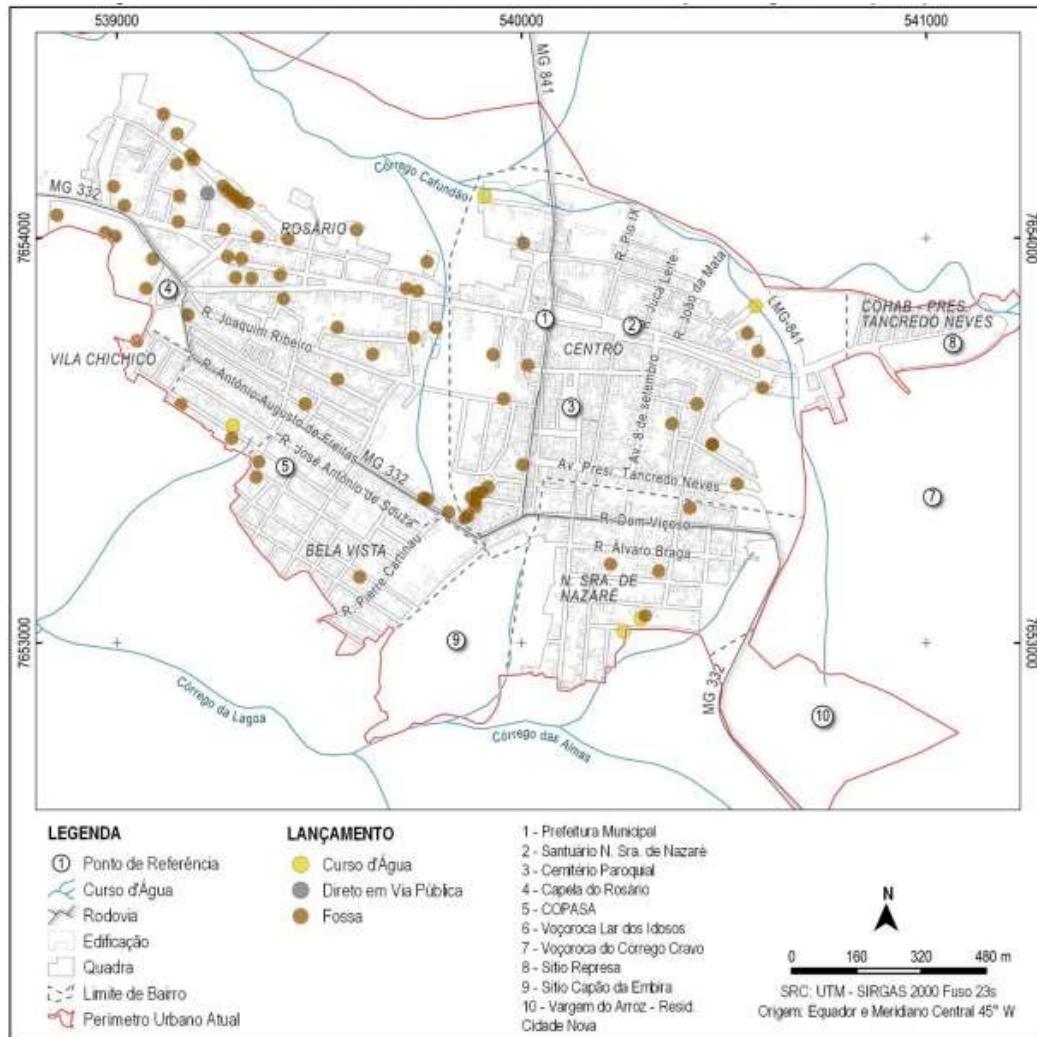


Fonte: Práxis Projetos e Consultoria, 2022.

Apesar da cobertura elevada, persistem irregularidades nas conexões domiciliares. Aproximadamente 4,5% das residências utilizam fossas sépticas ou sistemas rudimentares de armazenamento de esgoto, enquanto 0,3% realizam o lançamento direto em cursos d'água e 0,1% em vias públicas (Práxis, 2022). Em localidades específicas, como os povoados de Coqueiros e Estação Nazareno, o despejo ocorre diretamente no Rio das Mortes, evidenciando problemas de controle e fiscalização (Práxis, 2022).

A **Figure 5.2 - Localidades Fossas** evidencia a distribuição espacial dos domicílios que declararam utilizar fossas sépticas ou que realizam lançamentos diretos em cursos d'água e vias públicas. Observa-se uma maior concentração de fossas nos bairros Rosário, Bela Vista e Vila Chicão, especialmente em áreas periféricas e em trechos onde a topografia desfavorável dificulta a ligação à rede. Já os lançamentos diretos aparecem próximos aos cursos d'água, como os córregos Cafundão e das Almas, indicando risco potencial de contaminação hídrica e impacto direto sobre a saúde pública e o meio ambiente.

Figure 5.2 - Localidades Fossas



Fonte: Práxis Projetos e Consultoria, 2022.

As deficiências do SES concentram-se em determinadas áreas urbanas, principalmente no bairro Rosário e no entorno do Pastinho. O setor censitário, que faz parte do bairro Rosário, apresentava em 2010 a maior densidade demográfica urbana do município, com 85,93 hab/ha, associado aos piores indicadores de renda e alfabetização, configurando uma área de alta vulnerabilidade social (Práxis, 2022). Esses fatores socioeconômicos, combinados à precariedade da rede coletora, resultam em elevada exposição da população a riscos sanitários e ambientais.

O contexto topográfico também influencia a inadequação do SES. Áreas como a Rua Tenente Gabriel e a Rua Juvenato Guimarães apresentam declividade inversa, com residências localizadas abaixo do greide da via, inviabilizando a ligação por gravidade à rede coletora e forçando a adoção de soluções individuais, como fossas sépticas. A expansão urbana recente, exemplificada pelo Residencial Cidade Nova, ocupa áreas limítrofes ao Parque Natural Municipal da Voçoroca do Córrego do Cravo, aumentando a pressão sobre o sistema e exigindo planejamento integrado com critérios ambientais (Práxis, 2022). Nas áreas rurais e povoados, predominam sistemas individuais rudimentares, enquanto os Soluções de Abastecimento Coletivo (SACs) existentes carecem de tratamento de água e monitoramento regular, comprometendo a segurança ambiental e sanitária (Práxis, 2022).

O lançamento de esgoto sem tratamento afeta diretamente os mananciais que circundam a sede municipal e a bacia hidrográfica local. Na sede, os córregos Cafundão e das Almas recebem efluentes domésticos, associados ao assoreamento e degradação ambiental. O Córrego Ananias, principal manancial utilizado para captação de água potável, também é impactado por despejos diretos, além da possibilidade de contaminação por defensivos agrícolas utilizados em cafezais na bacia (Fundação Gorceix, 2024). Nazareno está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Grande, na interface das Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRHs) Alto Rio Grande (GD1) e Rio das Mortes (GD2) (Práxis, 2022). Nas áreas rurais, povoados como Coqueiros, Estação Nazareno e Cachoeirinha apresentam histórico de inundação pelo Rio das Mortes, afetando cerca de 30 domicílios, configurando risco físico e sanitário adicional (Fundação Gorceix, 2024).

Do ponto de vista institucional e legal, a gestão do saneamento enfrenta desafios significativos. A prestação do serviço de esgotamento sanitário é de responsabilidade da Prefeitura Municipal, que não possui licenciamento ambiental nem ETE operante. O Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) de 2013 existe, mas não é utilizado de forma efetiva como ferramenta de gestão. O Conselho Municipal de Saneamento Básico (COMSAB) existe formalmente, mas sua atuação é limitada, e não há cobrança pela prestação do serviço de esgotamento sanitário, comprometendo a sustentabilidade financeira do sistema (Fundação Gorceix, 2024).

Em relação à caracterização do esgoto, não existem estudos locais detalhados de composição físico-química e biológica (von Sperling, 1996). Para fins de dimensionamento da futura ETE,

adotaram-se parâmetros de referência estabelecidos na literatura técnica brasileira, considerando o esgoto doméstico típico, sendo: DBO₅ per capita de aproximadamente 54 g/hab·dia, variação de DBO₅ no esgoto bruto entre 300 e 350 mg/L, relação DQO/DBO₅ entre 1,2 e 2,0, e variação de SST entre 150 e 450 mg/L (VON SPERLING, 1996). A adoção desses parâmetros permitiu estimar cargas orgânicas e dimensionar as unidades da ETE de forma adequada, considerando o horizonte de projeto estabelecido.

5.2. População Projetada

O horizonte de projeto adotado para o dimensionamento da Estação de Tratamento de Esgotos do município de Nazareno (MG) foi estabelecido até o ano de 2050. A estimativa da população futura constitui uma etapa essencial, uma vez que determina as vazões de contribuição, as cargas orgânicas afluentes e, por consequência, as dimensões das unidades que compõem o sistema de tratamento. Para essa finalidade, adotou-se o Método Aritmético, que pressupõe um crescimento linear ao longo do tempo e é apropriado para municípios de pequeno porte com histórico demográfico estável, condição observada em Nazareno, cujas variações populacionais entre os censos recentes são pequenas e distribuídas de forma próxima à linearidade.

Os dados populacionais utilizados foram obtidos junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), correspondentes aos Censos Demográficos e às Estimativas Oficiais. Os valores disponíveis para os anos de 2000, 2010 e 2022 encontram-se apresentados na **Tabela 5.1**.

Tabela 5.1 - População Calculada

| Ano | População (hab) | Fonte |
|------|-----------------|-------------------------------|
| 2000 | 7240 | IBGE (Censo Demográfico 2000) |
| 2010 | 7954 | IBGE (Censo Demográfico 2010) |
| 2022 | 8179 | IBGE (Censo Demográfico 2022) |

Fonte: O autor.

Para o cálculo da taxa média anual de crescimento aritmético, utilizou-se diretamente o intervalo de 12 anos entre 2010 e 2022. A taxa média de crescimento anual foi obtida conforme a Equação 5.1:

$$k_a = \frac{P_{2022} - P_{2010}}{2022 - 2010} \quad (5.1)$$

Substituindo os valores observados a Equação 5.2:

$$k_a = \frac{8179 - 7954}{12} = 18,75 \text{ hab/ano} \quad (5.2)$$

Com base na taxa de crescimento, a população de 2020 foi estimada pela Equação 5.3:

$$\begin{aligned} P_{2025} &= P_{2022} + k_a \times (2025 - 2022) \\ P_{2020} &= 8179 + 18,75 \times 3 = 8.235 \text{ habitantes} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Com a taxa anual definida, projetou-se a população para os horizontes de início do plano (2025) e fim do plano (2050), conforme a equação geral do Método Aritmético, da pela Equação 5.4:

$$P_{2050} = P_{2022} + k_a \times (2050 - 2022) = 8.704 \text{ hab} \quad (5.4)$$

Esses resultados demonstram que o município apresenta crescimento populacional moderado e linear, característica típica de cidades pequenas com baixa variabilidade demográfica. A adoção do Método Aritmético é, portanto, tecnicamente adequada, garantindo projeções realistas e evitando superdimensionamento das unidades da ETE. Esses valores serão utilizados como base para o cálculo das vazões de contribuição, cargas orgânicas e dimensionamento dos componentes da Estação de Tratamento de Esgotos de Nazareno (MG).

5.3. Vazão máxima de esgoto

A determinação das vazões de projeto foi realizada aplicando-se os parâmetros definidos pelas normas ABNT NBR 9648:1986 e NBR 9649:1986, e as equações propostas por Alem Sobrinho e Tsutiya (2000). Considerando- se o ano de 2050 como limítrofe para a condição de máxima contribuição de esgoto sanitário afluente à ETE do município de Nazareno (MG).

A população projetada para o horizonte de 2050 foi obtida por meio de projeção demográfica municipal e utilizada no cálculo da vazão doméstica média (Q_D). Considerou-se um consumo per capita futuro ($Q_{PC,f}$) de 156,49 L/hab.dia, segundo o Diagnóstico Técnico-Participativo da

cidade, e o coeficiente de retorno (C) de 0,8, conforme recomendação da NBR 9649 (ABNT, 1986). Aplicando a equação:

Para o ano de 2025 a vazão doméstica média encontrada pela Equação 5.5 é:

$$Q_{D,méd} = \frac{P_f \times Q_{PC,d} \times C}{86400} = \frac{8235 \times 156,49 \times 0,8}{86400} = 11,93 \text{ L/s} \quad (5.5)$$

obteve-se uma vazão doméstica média de 11,93 L/s, representando o esgoto gerado pela população residente na área de contribuição.

Já para o ano de 2050 a vazão doméstica média encontrada pela Equação 5.6 é:

$$Q_{D,méd} = \frac{P_f \times Q_{PC,d} \times C}{86400} = \frac{8704 \times 156,49 \times 0,8}{86400} = 12,61 \text{ L/s} \quad (5.6)$$

A vazão de infiltração ($Q_{inf,f}$), correspondente às contribuições indevidas de águas pluviais e subterrâneas na rede coletora, foi calculada considerando uma taxa de infiltração (T) de 0,3 L/s·km e uma extensão total da rede (L) de 47 km, conforme os dados obtidos no item 8.6.1 – Zona Urbana do Produto 2 – Diagnóstico Técnico-Participativo. A vazão de infiltração resultante calculada pela Equação 5.7 foi:

$$Q_{inf,f} = T \times L = 0,3 \times 47 = 14,1 \text{ L/s} \quad (5.7)$$

A contribuição industrial e comercial para a vazão de esgoto na zona urbana de Nazareno foi estimada em 10% da vazão média doméstica, devido à ausência de grandes indústrias com alto consumo de água no sistema (Nazareno, 2023, p. 288), como demonstrado pela Equação 5.8:

$$Q_{ind} = Q_{D,méd} \times 0,1 \quad (5.8)$$

As vazões industriais no início e final do plano serão respectivamente, 1,19 e 1,26 L/s. Com isso, a vazão média total de começo e final de plano ($Q_{total,final}$), soma das parcelas médias doméstica e de infiltração, São, respectivamente, 27,22 L/s e 27,97 L/s.

A partir da vazão média, determinaram-se as vazões extremas de operação da ETE. A vazão máxima de projeto ($Q_{máx,ETE}$), calculada aplicando-se os coeficientes de pico diário e horário

conforme Alem Sobrinho e Tsutiya (2000), foi de 35,57 L/s, para o começo do plano, e de 36,8 L/s para o final do plano. A vazão mínima ($Q_{mín,ETE}$), obtida considerando o coeficiente de mínima vazão horária ($K_3 = 0,5$), foi de 20,06 L/s e 20,41 L/s.

Esses resultados indicam que o sistema deve ser projetado para operar em uma faixa de vazão de 20,06 a 36,8 L/s, com vazão média de 27,97 L/s, assegurando eficiência hidráulica e estabilidade biológica da ETE.

A análise evidencia que a contribuição de infiltração (14,1 L/s) representa uma parcela relevante da vazão total, aproximadamente 50% da vazão doméstica média, ressaltando a importância de ações de manutenção e controle da rede coletora para reduzir perdas e infiltrações.

Os coeficientes de variação calculados, $Q_{máx} = 1,36$ e $Q_{mín} = 0,77$, estão dentro dos limites recomendados por Alem Sobrinho e Tsutiya (2000), indicando que o sistema apresenta variações compatíveis com a realidade urbana e garantindo estabilidade operacional durante períodos de pico e baixa contribuição.

Portanto, os resultados obtidos fornecem subsídios técnicos sólidos para o dimensionamento das unidades de tratamento da ETE, permitindo que o sistema seja eficiente, seguro e compatível com a infraestrutura existente do município de Nazareno (MG), conforme as normas técnicas e as contribuições do Produto 2 – Diagnóstico Técnico-Participativo.

5.4. Dimensionamento Geral da ETE

O dimensionamento das unidades da ETE proposta para o município de Nazareno (MG) foi realizado a partir dos parâmetros médios obtidos no diagnóstico técnico-participativo, utilizando as equações clássicas descritas por Von Sperling (2014) e pela NBR 12.209/2011.

O sistema foi projetado considerando a vazão máxima diária de $Q_{máx} = 36,8$ L/s e a vazão média diária de $Q_{Med} = 27,97$ L/s correspondentes ao horizonte de projeto de 2050. A seguir, apresentam-se as etapas de cálculo e discussão dos resultados obtidos para cada unidade do tratamento preliminar, primário e secundário.

5.4.1. Calha Parshall

A Calha *Parshall* foi adotada nesta Estação de Tratamento de Esgotos como unidade de medição de vazão, permitindo o controle operacional do sistema e o monitoramento contínuo do escoamento afluente. O dimensionamento foi desenvolvido com base nas vazões projetadas para o final de plano, garantindo que a unidade opere adequadamente em todas as condições hidráulicas previstas.

A seleção da calha segue as recomendações usuais de dimensionamento, baseadas na compatibilidade entre a largura da garganta (W) e a faixa de vazões a serem medidas. Para as vazões previstas, a calha com largura de garganta igual a 22,9 cm apresenta faixa operacional ampla e adequada para a medição precisa das vazões mínima, média e máxima do projeto, como apresentada na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Tabela para dimensionamento da Calha *Parshall*

| L_n | W | A | B | C | D | F | G | M | P | Q_{min} | Q_{max} |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|-------|-----------|-----------|
| 7 | 7,6 | 46,7 | 45,7 | 17,8 | 25,9 | 15,2 | 30,5 | 30,5 | 76,8 | 0,8 | 53,8 |
| 15 | 15,2 | 62,1 | 61,0 | 39,4 | 39,7 | 30,5 | 61,0 | 30,5 | 90,2 | 1,4 | 110,4 |
| 22 | 22,9 | 88,0 | 86,4 | 38,1 | 57,5 | 30,5 | 45,7 | 30,5 | 108,0 | 2,5 | 252,0 |
| 30 | 30,5 | 137,2 | 134,3 | 61,0 | 84,5 | 61,0 | 91,4 | 38,1 | 149,2 | 3,1 | 455,9 |
| 45 | 45,7 | 144,8 | 134,3 | 76,2 | 102,6 | 61,0 | 91,4 | 38,1 | 167,6 | 4,2 | 696,6 |
| 60 | 61,0 | 152,4 | 149,5 | 91,4 | 149,9 | 61,0 | 91,4 | 38,1 | 185,4 | 11,9 | 937,3 |
| 90 | 91,5 | 167,6 | 164,5 | 121,9 | 157,2 | 61,0 | 91,4 | 38,1 | 222,3 | 17,3 | 1427,2 |
| 120 | 121,9 | 182,9 | 179,4 | 152,4 | 193,7 | 61,0 | 91,4 | 45,7 | 271,1 | 36,8 | 1922,7 |
| 150 | 152,4 | 198,1 | 194,3 | 182,9 | 230,2 | 61,0 | 91,4 | 45,7 | 308,0 | 45,3 | 2423,9 |
| 180 | 182,9 | 213,4 | 209,2 | 213,4 | 266,7 | 61,0 | 91,4 | 45,7 | 344,2 | 73,6 | 2930,8 |
| 210 | 213,4 | 228,6 | 224,2 | 243,8 | 303,2 | 61,0 | 91,4 | 45,7 | 381,0 | 85,0 | 3437,7 |
| 240 | 243,8 | 243,8 | 239,1 | 274,3 | 339,7 | 61,0 | 91,4 | 45,7 | 417,2 | 99,1 | 3950,2 |

Fonte: Sobrinho e Tsutiya, 2000.

A equação característica da Calha Parshall para o cálculo da altura de água na garganta é dada pela Equação 5.9:

$$Q = 2,2 \times W \times h_2^{1,55} = 2,2 \times 0,229 \times h_2^{1,55} \quad (5.9)$$

A altura d'água na garganta da calha foi calculada para as três vazões características apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Vazão Calculada

| Vazão (Q) | Vazão (m³/s) | Altura (m) |
|-----------|--------------|------------|
| Máxima | 0,0368 | 0,20m |
| Média | 0,02797 | 0,16m |
| Mínima | 0,02041 | 0,12m |

Fonte: O autor.

Esses valores definem a faixa de medição operacional da calha para as condições de escoamento previstas.

O rebaixo (h1) corresponde ao desnível necessário antes da calha para garantir o escoamento livre e evitar a formação de remanso a montante foi calculado pela Equação 5.10:

$$h_1 = \frac{Q_{max} \times h_{2,min} - Q_{min} \times h_{2,max}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (5.10)$$

$$h_1 = \frac{0,0368 \times 0,12 - 0,02041 \times 0,20}{0,0368 - 0,02041} = 0,020m$$

A calha selecionada apresenta capacidade adequada para a medição das vazões estimadas, garantindo precisão, sensibilidade e segurança operacional. O rebaixo calculado será utilizado como referência para o posicionamento das unidades subsequentes, especialmente a caixa de areia, assegurando a compatibilidade hidráulica entre as etapas do tratamento preliminar.

5.4.2. Caixa de Areia (Desarenador)

O desarenador tem como função remover partículas minerais (areia, cascalho, fragmentos) que possam causar abrasão ou acúmulo nas tubulações. Esta unidade reduz o desgaste mecânico e melhora a eficiência dos tanques subsequentes.

O dimensionamento utilizou como referência o rebaixo da Calha *Parshall* e as alturas de água determinadas no item anterior, assegurando compatibilidade hidráulica entre todas as etapas do tratamento preliminar, encontrando sua altura a partir da Equação 5.11 e mostrado os resultados na Tabela 5.4.

$$H1 = h2 - h1 \quad (5.11)$$

Tabela 5.4 - Tabela Vazões

| Vazão (Q) | h2 (m) | h1 (m) | H1 (m) |
|-----------|--------|--------|--------|
| Máxima | 0,20m | 0,02m | 0,18m |

| | | | |
|--------|-------|-------|-------|
| Média | 0,16m | 0,02m | 0,14m |
| Mínima | 0,12m | 0,02m | 0,10m |

Fonte: O autor.

Para o dimensionamento, a velocidade de escoamento deve permanecer entre 0,20 m/s e 0,40 m/s, intervalo que impede tanto a deposição indevida de partículas quanto o arraste da areia já sedimentada. Para a condição média, foi adotada velocidade de projeto igual a 0,30 m/s, sendo a largura calculada pela Equação 5.12:

$$B = \frac{Q}{V \times H_1} = \frac{0,013985m^3/s}{0,30m/s \times 0,14m} = 0,333m = 0,35m \quad (5.12)$$

Uma vez adotada a largura da calha, verificou-se o atendimento ao critério de velocidade, a partir da Equação 5.13, para as condições máxima e mínima:

$$V = \frac{Q_{canal,méd}}{V \times H_1} \quad (5.13)$$

- Velocidade Máxima é da pela Equação 5.14:

$$V = \frac{0,0184m^3/s}{0,35m \times 0,18m} = 0,292m/s \quad (5.14)$$

Atende ao critério de < 0,40 m/s.

- Velocidade Mínima é dada pela Equação 5.15:

$$V = \frac{0,0102m^3/s}{0,35m \times 0,12m} = 0,243m/s \quad (5.15)$$

Atende ao critério de > 0,20 m/s.

Para o dimensionamento da área superficial do desarenador, adotou-se a Taxa Hidráulica Superficial (THS) conforme recomenda a NBR 12.209 (ABNT, 2011), que estabelece valores entre 600 e 1000 m³/m²·dia para sistemas que não dispõem de decantadores primários. Neste estudo, selecionou-se o valor máximo recomendado, correspondente a 1000 m³/m²·dia, equivalente a 0,01157 m³/m²·s, de modo a garantir maior eficiência na remoção dos sólidos sedimentáveis durante a vazão máxima de operação.

A área superficial da caixa de areia é dada pela Equação 5.16:

$$THS = \frac{Q_{máx}}{A_s} \rightarrow A_s = \frac{0,0184}{0,01157} = 1,59m^2 \quad (5.16)$$

A caixa de areia foi projetada com geometria prismática e base retangular. Dessa forma, o comprimento da unidade pode ser obtido pela relação dada na Equação 5.17:

$$A_s = B \times L \rightarrow L = \frac{A_s}{B} = \frac{1,59}{0,35} = 4,54 \text{ m} \quad (5.17)$$

Adotou-se:

$$L = 4,54 \text{ m}$$

A quantidade de material sedimentado foi estimada conforme o critério usual de remoção de 30 L de areia para cada 1000 m³ de esgoto afluente. Considerando a vazão média do sistema e um intervalo de limpeza de 15 dias, obteve-se o volume acumulado de 0,544m³. Assumindo distribuição uniforme do material no fundo do desarenador, a profundidade de armazenamento é calculada pela Equação 5.18:

$$P = \frac{MR}{A_s} = \frac{0,544}{1,59} = 0,34m \quad (5.18)$$

A profundidade obtida atende à NBR 12.209, que estabelece valor mínimo de 0,20 m para o compartimento de armazenamento de material sedimentado.

5.4.3. Gradeamento

O gradeamento é responsável pela remoção de sólidos grosseiros (como plásticos, panos, galhos e resíduos diversos) que possam danificar bombas e obstruir canalizações subsequentes. Essa etapa é fundamental para proteger as demais unidades da ETE e garantir a operação adequada do sistema.

O cálculo da largura útil da grade (b) é obtido pela Equação 5.19:

$$B = \frac{Q}{v \times h} \quad (5.19)$$

onde: Q= vazão máxima (m³/s); v = velocidade entre as barras (m²/s) e h = altura útil da lâmina de água (m).

A velocidade recomendada para o escoamento entre as barras, segundo a NBR 12.209/2011, é de 0,6 a 1,0 m/s. Adotou-se $v = 0,8 \text{ m/s}$. O espaçamento entre barras depende do tipo de grade, para grade grossa, utiliza-se espaçamento de 25 a 50 mm, e para grade fina, entre 6 e 20 mm.

Considerando a divisão da vazão máxima por duas canaletas operando em paralelo e uma altura útil adotada de 0,50 m, o gradeamento adotado apresentou largura por canaleta de 0,65m, suficiente para a vazão máxima de projeto. O dimensionamento seguiu a adoção de duas unidades paralelas, permitindo a manutenção sem interrupção da operação.

A eficiência de retenção, que relaciona a área de abertura com a área total da seção da grade, é calculada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Equação 5.20:

$$E = \frac{a}{a + t} = \frac{10\text{mm}}{10\text{mm} + 6\text{mm}} = 0,625 \rightarrow 62,5\% \quad (5.20)$$

Onde: E = Eficiência da grade (%); a = Espaçamento entre as barras (mm); t = Espessura das barras (mm). A Área Útil, que corresponde à soma da área de todas as aberturas, é determinada para garantir a velocidade de escoamento adotada na Equação 5.21:

$$Au = \frac{Q_{canal}}{V} = \frac{0,0184 \text{ m}^3/\text{s}}{0,8\text{m/s}} = 0,023\text{m}^2 \quad (5.21)$$

A área transversal do canal e a velocidade de aproximação são dadas na Equação 5.22:

$$S = B \times h = 0,65\text{m} \times 0,50\text{m} = 0,325\text{m}^2 \quad (5.22)$$

$$V_0 = \frac{Q_{canal}}{S} = \frac{0,0184 \text{ m}^3/\text{s}}{0,325\text{m/s}} = 0,057\text{m/s}$$

A baixa velocidade de aproximação (abaixo de 0,3 m/s) sugere o risco de sedimentação prévia à unidade, reforçando a importância do Desarenador para a remoção de sólidos. Já o número de barras necessário para a largura adotada foi calculado na Equação 5.23:

$$N = \frac{B}{a + t} = \frac{650 \text{ mm}}{10 \text{ mm} + 6 \text{ mm}} = 40,625 \rightarrow 41 \text{ barras} \quad (5.23)$$

A perda de carga para a grade em condição de limpeza total é dada na Equação 5.24:

$$h_{f,limpa} = 1,43 \times \frac{V^2 - V_0^2}{2g} = 1,43 \times \frac{0,8^2 - 0,057^2}{2 \times 9,81} = 0,046\text{m} \quad (5.24)$$

O valor obtido é coerente com o parâmetro de projeto, aproximadamente 0,05 m, confirmando o atendimento à condição de operação normal.

De acordo com a NBR 12209/2011, para sistemas com limpeza manual, a perda de carga não deve ultrapassar 0,15 m. Considerando 50% de obstrução, a velocidade no vão dobra, assumindo-se $v=1,6$ m/s. A perda de carga correspondente é demonstrada na Equação 5.25:

$$h_{f,50\%} = 1,43 \times \frac{V^2 - V_0^2}{2g} = 1,43 \times \frac{1,6^2 - 0,057^2}{2 \times 9,81} = 0,186m \quad (5.25)$$

A perda de carga resultante, 0,186 m, excede o limite de 0,15 m estabelecido pela norma para grades com limpeza manual, caracterizando não conformidade em condição crítica.

5.4.4. Reator Anaeróbio (UASB)

O reator UASB foi selecionado por sua eficiência na remoção de matéria orgânica e pela simplicidade operacional, sendo amplamente utilizado em pequenas e médias cidades brasileiras.

Inicialmente, a DQO, que representa a carga orgânica total, foi adotada seguindo uma relação $DQO/DBO = 2,5$ (Jardim; Canela,2004). Assim, para uma concentração inicial de DBO igual a 350 mg/L na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** (média para esgoto doméstico), obtém-se:

$$S_{0,DQO} = S_0 \times 2,5 = 350mg/L \times 2,5 = 875mg/L \text{ ou } 0,875Kg/m^3 \quad (5.26)$$

A carga diária de DQO afluente é dada pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.:**

$$L_0 = S_{0,DQO} \times Q_{média} = 0,875Kg/m^3 \times 2416,5 m^3/dia = 2114,4 KgDQO/dia \quad (5.27)$$

O volume do reator é obtido pela equação de TDH para verificação e dimensionado pela CVO (Carga Volumétrica Orgânica), que considera a carga de DBO remanescente do tratamento primário apresentado na Equação 5.28:

$$V = Q \times TDH = 100,7m^3/h \times 8h = 805,6m^3 \quad (5.28)$$

A Carga Volumétrica Orgânica (COV) é dada na Equação 5.29:

$$COV = \frac{Q_{média} \times DBO_{af}}{V} = 2,62 Kg DQO/(m^3 dia) \quad (5.29)$$

onde: $Q_{média}$ = vazão média; DBO_{af} = concentração de DBO afluente kg/m^3 , equivalente a g/L ou $g/L \cdot 10^{-3}$ e Valores típicos para TDH variam entre 6 a 10 horas (adotado: 8,0 horas). A Carga Orgânica Volumétrica (COV) foi calculada como parâmetro de verificação de desempenho. O valor de 2,62 kgDQO/m³.d atende aos critérios de estabilidade para esgotos domésticos, situando-se abaixo do limite típico de 5,0 kgDQO/m³.d (Chernicharo, 2007).

O reator UASB foi dimensionado com um volume útil de 805,6 m³, adotando um tempo de detenção hidráulica de 8,0 h. Esse dimensionamento resultou em uma carga volumétrica de 2,62 kg DBO/(m³·dia), valor considerado conservador e apropriado para assegurar a estabilidade operacional no clima da região.

A eficiência estimada do reator foi calculada conforme a Equação 5.30:

$$E_{DBO} = 100 \times (1 - 0,70 \times TDH^{-0,50}) = 75,3\% \quad (5.30)$$

A concentração de DBO afluente ao pós-tratamento (lagoas) se da pela Equação 5.31:

$$S_{afl} = S_0 \times (1 - \frac{E_{DBO}}{100}) = 86,4 \text{ mg/L} \quad (5.31)$$

Tais parâmetros garantem uma eficiência média de remoção de DBO entre 65% e 75%, conforme indicado por Von Sperling (2014). A remoção do lodo estabilizado pode ser realizada a cada 6 a 12 meses, destacando-se pela simplicidade operacional e pelo baixo consumo energético.

5.4.5. Lagoa Facultativa

A carga orgânica afluente foi calculada a partir da massa de DBO que entra diariamente na lagoa facultativa. Sendo calculada pela Equação 5.32:

$$L = \frac{S_0 \times Q_{média}}{1000} = \frac{86,4 \text{ g/m}^3 \times 2416,5 \text{ m}^3/d}{1000} = 208,8 \text{ KgDBO/dia} \quad (5.32)$$

A área requerida da lagoa facultativa é dada na Equação 5.33:

$$A = \frac{L}{L_s} = \frac{208,8 \text{ KgDBO/dia}}{350 \text{ KgDBO/ha dia}} = 5960 \text{ m}^3 \quad (5.33)$$

Para o sistema proposto, optou-se por dividir a área total em duas unidades operando em série. Essa configuração promove melhoria do regime hidráulico, reduz a ocorrência de curtos-

circuitos e aumenta a eficiência de remoção sem alterar o volume útil nem demandar obras adicionais significativas.

Ao adotar a configuração em série, é fundamental verificar a carga aplicada especificamente na primeira unidade, uma vez que esta recebe a totalidade da carga orgânica afluente do pós-tratamento. Considerando a área unitária de 2.980 m² e a carga remanescente do reator UASB, a Taxa de Aplicação Superficial (\$L_s\$) na primeira lagoa atinge valores próximos a 700 kgDBO/ha.dia.

Embora este valor supere a faixa típica recomendada por Von Sperling (2014) para lagoas facultativas convencionais (150 a 350 kgDBO/ha.dia), tal configuração é admissível considerando-se dois fatores: (1) o pré-tratamento eficiente pelo reator UASB, que remove a fração mais instável da matéria orgânica; e (2) o comportamento da primeira unidade como uma lagoa facultativa de alta taxa. Nessa dinâmica, a primeira lagoa prioriza a remoção de DBO (sujeita a condições parcialmente anóxicas em profundidade), enquanto a segunda unidade, operando com carga reduzida, assegura o polimento final e a elevada eficiência na remoção de patógenos, garantindo o enquadramento sanitário do efluente.

O desempenho da lagoa em série foi estimado utilizando a Equação 5.34 de cinética de primeira ordem para sistemas compartmentalizados:

$$S = \frac{S_0}{(1 + K_T \times \frac{t}{n})^n} \quad (5.34)$$

Em que: $S_0 = 86,4 \text{ mg/L}$; $K_T = 0,497 \text{ por dia}$; $t = 3,70 \text{ e } n = 2$ (duas lagoas em série)

Substituindo na Equação 5.35:

$$S = \frac{86,4}{(1 + 0,497 \times 1,85)^2} = 23,48 \text{ mg/L} \quad (5.35)$$

A eficiência global resultante, representada na Equação 5.36, pode ser calculado por:

$$E = \frac{350 - 23,48}{350} \times 100 = 93,29 \% \quad (5.36)$$

A eficiência global da ETE, considerando todas as unidades, atinge valores médios de 80 a 90% na remoção de DBO e 70 a 85% na remoção de SST, atendendo aos padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho atingiu seu objetivo principal ao elaborar uma proposta de dimensionamento tecnicamente consistente para uma ETE no município de Nazareno (MG). O diagnóstico do sistema atual evidenciou uma contradição relevante: apesar de a rede coletora atender 95,1% dos domicílios urbanos, todo o esgoto coletado é lançado *in natura* nos corpos hídricos, comprometendo a qualidade ambiental do Córrego das Almas, além de representar riscos à saúde pública.

Com base na projeção populacional para o horizonte de 2050, foram definidas as vazões de projeto, resultando em uma Vazão Média de 27,97 L/s e uma Vazão Máxima de 36,8 L/s. A avaliação das vazões também revelou uma contribuição expressiva de infiltração (14,1 L/s), valor superior à vazão doméstica de final de plano (12,61 L/s), indicando a necessidade de intervenções futuras de manutenção e controle de perdas na rede existente.

Para o tratamento, adotou-se como unidade principal o Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB), seguido de pós-tratamento em Lagoa Facultativa composta por duas células em série ($n = 2$). O dimensionamento, conduzido segundo as metodologias de Chernicharo (1997) e Von Sperling (2014), definiu um reator UASB com volume de 805,6 m³ e uma área total de lagoas de 5.960 m².

O sistema proposto demonstrou robustez e conformidade com a legislação vigente. A configuração em série no pós-tratamento foi determinante para o aumento da eficiência global, resultando em um efluente final com concentração estimada de 23,48 mg/L e uma Eficiência Global de Remoção de DBO de 93,29%. Estes resultados asseguram o atendimento simultâneo aos limites da Resolução CONAMA nº 430/2011 (Federal), que estabelece eficiência mínima de remoção de 60%, e às exigências mais restritivas da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 08/2022 (Estadual), cumprindo tanto o padrão de lançamento de

concentração ($< 60\text{mg/L}$) quanto a meta de eficiência mínima (85%) exigida para a bacia hidrográfica local.

Dessa forma, recomenda-se a adoção da tecnologia do reator UASB associado a lagoas facultativas em série para o município de Nazareno, oferecendo alta eficiência de remoção de matéria orgânica, simplicidade operacional e baixo custo, aspectos coerentes com as condições climáticas locais. Recomenda-se que essa proposta de dimensionamento seja adotada como base técnica para a implantação da ETE, constituindo um passo essencial para reverter o passivo ambiental existente, proteger os recursos hídricos e avançar no cumprimento das metas de universalização do saneamento (ODS 6).

7. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Atlas da água: segurança hídrica no Brasil. Brasília, DF: ANA, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ana>. Acesso em: 6 maio 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO – ANA. Panorama do saneamento no Brasil. Brasília, DF: ANA, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/assuntos/saneamento-basico/saneamento-basico-no-brasil/panorama-do-saneamento-no-brasil-1>. Acesso em: 23 jun. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 9648:1986: Estudo de concepção de sistema de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 9649:1986: Projeto de rede coletora de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 12208:1992: Projeto de estação de tratamento de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – SNIS. Brasília, DF: MCidades, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/snis>. Acesso em: 6 maio 2025.

CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. Reatores anaeróbios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997. 246 p. v. 5. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias).

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE – FUNASA. Manual de saneamento. 5. ed. Brasília, DF: Funasa, 2019. ISBN 978-85-7346-060-5. Disponível em: <https://repositorio.funasa.gov.br/handle/123456789/506>. Acesso em: 19 jun. 2025.

HANAI, Frederico Yuri; CAMPOS, José Roberto. Avaliação da infiltração na rede coletora de esgotos na bacia do Ribeirão do Ouro da cidade de Araraquara – SP. In:

CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19., 1997, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: ABES, 1997. p. 581-593. Acesso em: 23 jun. 2025.

INFOSANBAS. Nazareno – MG. Infosanbas, 2025. Disponível em: <https://infosanbas.org.br/municipio/nazareno-mg/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

INBEC – INSTITUTO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO E CULTURA. Desafios do saneamento no Brasil: uma análise das questões e possíveis soluções. 2025. Disponível em: <https://inbec.com.br/blog/desafios-saneamento-brasil-uma-analise-questoes-possiveis-solucoes>. Acesso em: 23 jun. 2025.

INSTITUTO TRATA BRASIL. Impactos da falta de saneamento. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2023. Disponível em: <https://www.tratabrasil.org.br>. Acesso em: 15 abr. 2025.

JARDIM, W. F.; CANELA, M. C. Fundamentos da oxidação química no tratamento de efluentes e remediação de solos. São Paulo; Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, Laboratório de Química Ambiental, 2004.

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

MATOS, S. C.; FERREIRA, J. C.; FERNANDES, F. de F.; SOUZA, R. J. Q. de. Proposta de rede coletora de esgoto sanitário em uma área da cidade de Manaus. In: XVII Safety, Health and Environment World Congress, 2017, Vila Real, Portugal. Anais [...], 2017. DOI: 10.14684/SHEWC.17.2017.203-208. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/347525003_Proposta_de_rede_coletora_de_esgoto_sanitario_em uma_area_da_cidade_de_Manaus - Proposal_of_a_sanitary_sewage_collection_system_in_an_area_of_the_city_of_Manaus. Acesso em: 15 abr. 2025.

NAZARENO (Minas Gerais). Prefeitura Municipal. Plano Municipal de Saneamento Básico. Elaboração: Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Nazareno, 2013.

NAZARENO (Minas Gerais). Prefeitura Municipal. Plano Diretor Participativo de Nazareno - MG: pesquisa de perfil socioeconômico (Etapa 3). Versão 01. Elaboração: Práxis Projetos e Consultoria. Belo Horizonte, nov. 2022.

NAZARENO (Minas Gerais). Prefeitura Municipal. Plano Diretor Participativo de Nazareno - MG: diagnóstico integrado (Etapa 5). Versão 02. Elaboração: Práxis Projetos e Consultoria. Belo Horizonte, jan. 2023.

NAZARENO (Minas Gerais). Prefeitura Municipal. Revisão e complementação do Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB) e incorporação do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) ao PMSB: Produto 4.1A – Relatório de programas, projetos, ações e plano de monitoramento do PMSB. Elaboração: Fundação Gorceix. Nazareno, ago. 2024.

OMS; UNICEF. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene: 2000–2020. Geneva: WHO; UNICEF, 2021. Disponível em: <https://www.who.int>. Acesso em: 15 abr. 2025.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 6). Nova York: ONU, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org>. Acesso em: 15 abr. 2025.

SANTOS, Gabriel Bortoluzzi dos. Pré-dimensionamento da rede coletora de esgoto sanitário do município de Rio Bonito do Iguaçu. 2022. TCC (Engenharia Civil) – UTFPR, Pato Branco, 2022. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/30581>. Acesso em: 29 jun. 2025.

SOBRINHO, Pedro Alem; TSUTIYA, Milton Tomoyuki. *Coleta e transporte de esgoto sanitário*. 2. ed. São Paulo: Manole, 2000.

VIEIRA, J. M. de S.; VALÉRIO FILHO, M.; MENDES, R. M. Desigualdades no saneamento de pequenas cidades de uma região metropolitana. *Geografia* (Londrina), v. 34, n. 1, p. 109–129, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5433/2447-1747.2025v34n1p109>. Acesso em: 23 jun. 2025.

VON SPERLING, Marcos. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 2. ed. rev. Belo Horizonte: UFMG, 1996. 240 p. v. 1. (Princípios do tratamento biológico de águas resíduárias).

VON SPERLING, Marcos. Princípios básicos do tratamento de esgotos. Belo Horizonte: UFMG, 1996. 211 p. v. 2. (Princípios do tratamento biológico de águas resíduárias).

VON SPERLING, Marcos. Lagoas de estabilização. Belo Horizonte: UFMG, 1996. 134 p. v. 3. (Princípios do tratamento biológico de águas resíduárias).

VON SPERLING, Marcos. Lodos ativados. 2. ed. amp. Belo Horizonte: UFMG, 2002. 428 p. v. 4. (Princípios do tratamento biológico de águas resíduárias).