

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – *CAMPUS* SANTA LUZIA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

JÚLIA REBECA ROCHA CAVALCANTI

**ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS NO PROCESSO
DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO: ESTUDO DE CASO EM UMA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM MINAS GERAIS**

Minas Gerais

2026

JÚLIA REBECA ROCHA CAVALCANTI

**ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS NO PROCESSO
DE TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO: ESTUDO DE CASO EM UMA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO EM MINAS GERAIS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil apresentado ao Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus* Santa Luzia como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Doutor Daniel Augusto de Miranda
Coorientadora: Prof. Mestra Isabela Ferreira Batista

Minas Gerais

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C377a Cavalcanti, Júlia Rebeca Rocha.

Análise do aproveitamento energético do biogás no processo de tratamento de esgoto sanitário: estudo de caso em uma Estação de Tratamento de Esgoto em Minas Gerais. / Júlia Rebeca Rocha Cavalcanti. - 2026.

103f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - Campus Santa Luzia, 2026.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Augusto de Miranda.

1. esgoto — purificação. 2. estações de tratamento de águas residuais – conservação de energia. I. Miranda, Daniel Augusto de (orient.). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Santa Luzia, MG. III. Título.

CDU: 628.35



INSTITUTO FEDERAL MINAS GERAIS

Campus Santa Luzia - Código INEP: 31358150

Rua Érico Veríssimo, nº. 317, Bairro Londrina, CEP: 33115-390, Santa Luzia/MG

CNPJ: 10.626.896/0015-78 - Telefone: (31) 3268-5600

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Na presente data realizou-se a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **Análise do potencial do aproveitamento energético do biogás no processo de tratamento de esgoto sanitário: estudo de caso em uma Estação de Tratamento de Esgoto em Minas Gerais**, apresentada pela estudante **Júlia Rebeca Rocha Cavalcanti** do Curso Bacharelado em Engenharia Civil (*Campus* Santa Luzia). Os trabalhos foram iniciados às 17h06min do dia 03/02/2026 pelo professor presidente da banca examinadora, constituída pelos seguintes membros:

- Nome do orientador: Prof. Dr. Daniel Augusto de Miranda
- Nome da coorientadora: Prof.^a Ma. Isabela Ferreira Batista
- Nome da Examinadora Interna: Prof. Dr.^a Verônica Bernardes de Souza Léo
- Nome do Examinador Interno: Prof. Dr. Neimar Freitas Duarte

A banca examinadora, tendo terminado a apresentação do conteúdo do Trabalho de Conclusão de Curso, passou à arguição da candidata. Em seguida, os examinadores reuniram-se para avaliação e deram o parecer final sobre o trabalho apresentado pela aluna, tendo sido atribuído o seguinte resultado: **Aprovada** com nota **96,0**.

Proclamados os resultados pelo presidente da banca examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, eu Daniel Augusto de Miranda lavrei a presente ata que assino juntamente com os demais membros da banca examinadora.

Santa Luzia – MG, 03 de fevereiro de 2026.

Documento assinado digitalmente
gov.br DANIEL AUGUSTO DE MIRANDA
Data: 03/02/2026 18:33:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Daniel Augusto de Miranda

Documento assinado digitalmente
gov.br ISABELA FERREIRA BATISTA
Data: 03/02/2026 18:37:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Ma. Isabela Ferreira Batista

Documento assinado digitalmente
gov.br VERONICA BERNARDES DE SOUZA LEO
Data: 03/02/2026 18:47:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr.^a Verônica Bernardes de Souza Léo

Documento assinado digitalmente
gov.br NEIMAR DE FREITAS DUARTE
Data: 03/02/2026 21:10:19-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Neimar Freitas Duarte

RESUMO

O aproveitamento energético do biogás em estações de tratamento de esgoto sanitário representa uma alternativa sustentável para o setor de saneamento, contribuindo para a transição energética e a redução de impactos ambientais. Este estudo teve como objetivo avaliar o potencial de produção de biogás em uma Estação de Tratamento de Esgoto localizada no estado de Minas Gerais, por meio da análise do desempenho operacional, do balanço de massa do gás e das eficiências de remoção das unidades de tratamento. Trata-se de um estudo de caso, desenvolvido a partir de visita técnica, consulta a dados de monitoramento histórico, os quais são públicos e acessíveis nos canais oficiais da operadora, e processamento computacional por meio de planilhas elaboradas no *software* Microsoft Excel, com base em métodos consagrados de estimativa de produção de metano descritos por Chernicharo (2007) e Ramos (2008). Os resultados demonstraram elevada eficiência na remoção de DBO, DQO, sólidos suspensos totais e compostos nitrogenados, indicando adequado desempenho das unidades biológicas. Contudo, a subcarga orgânica decorrente da diluição excessiva do afluente em períodos chuvosos comprometeu a estabilidade dos reatores e reduziu o potencial de geração de biogás. A análise comparativa entre valores de projeto, dados operacionais e estatísticas, revelou discrepâncias relevantes nas cargas afluentes, refletindo limitações estruturais da bacia de contribuição e interferências hidráulicas decorrentes de contribuições indevidas de águas pluviais. Conclui-se que, embora a tecnologia instalada apresente capacidade para produção significativa de biogás, o aproveitamento energético somente se torna viável quando o sistema opera com cargas compatíveis com seu dimensionamento, reforçando a necessidade de ações de controle na rede coletora.

Palavras-chave: Biogás. Tratamento de esgoto. Energia renovável.

ABSTRACT

The energy recovery of biogas in sanitary sewage treatment plants represents a sustainable alternative for the sanitation sector, contributing to the energy transition and the reduction of environmental impacts. This study aimed to evaluate the potential for biogas production at a Sewage Treatment Plant located in the state of Minas Gerais, Brazil, through the analysis of operational performance, the gas mass balance, and the removal efficiencies of the treatment units. This is a case study developed from a technical visit, consultation of historical monitoring data, which are public and accessible on the operator's official channels, and computational processing using spreadsheets elaborated in Microsoft Excel software, based on established methods for estimating methane production described by Chernicharo (2007) and Ramos (2008). The results demonstrated high efficiency in the removal of DQO, DBO, total suspended solids, and nitrogen compounds, indicating adequate performance of the biological units. However, the organic underload resulting from the excessive dilution of the influent during rainy periods compromised the stability of the reactors and significantly reduced the biogas generation potential. The comparative analysis between design values, operational data, and statistics revealed significant discrepancies in influent loads, reflecting structural limitations of the drainage basin and hydraulic interferences resulting from illegal stormwater inflows. It is concluded that, although the installed technology has the capacity for significant biogas production, energy recovery only becomes viable when the system operates with loads compatible with its design, reinforcing the need for control actions in the collection network.

Keywords: Biogas. Sewage treatment. Renewable energy.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COE	Carga orgânica específica
COV	Carga orgânica volumétrica
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DGAE	Digestão aeróbia
DGAN	Digestão anaeróbia
DN	Deliberação Normativa
DQO	Demanda química de oxigênio
DS	Decantador secundário
DT	Decantador terciário
EE	Estação elevatória
ER	<i>Exchange rate</i>
ETE	Estação de tratamento de esgoto
FA	Filtro anaeróbio
FBP	Filtro biológico percolador
FBP-N	Filtro biológico percolador nitrificante
FP	Filtro de pedras
FQ	Tratamento físico-químico
IFAS	<i>Integrated Fixed Film Activated Sludge</i>
IFAS-ND	<i>Integrated Fixed Film Activated Sludge</i> com nitrificação e desnitrificação
LAE	Lagoa facultativa aerada
LAN	Lagoa anaeróbia
LF	Lagoa facultativa
LGA	Lodo granular aeróbio / Nereda
LM	Lagoa de maturação
LA	Lodos ativados
LAP	Lodos ativados aeração prolongada
LA-N	Lodos ativados com nitrificação
LA-ND	Lodos ativados com nitrificação e desnitrificação
LA-NDP	Lodos ativados com nitrificação, desnitrificação e remoção biológica de fósforo
LAP-N	Lodos ativados aeração prolongada com nitrificação
LAP-ND	Lodos ativados aeração prolongada com nitrificação, desnitrificação e remoção biológica de fósforo
LP-N	Lagoa de polimento nitrificante
LS	Taxa de aplicação superficial
LV	Carga orgânica volumétrica
MBBR-N	<i>Moving Bed Biofilm Reactor</i> com nitrificação

MBBR-ND	<i>Moving Bed Biofilm Reactor</i> com nitrificação e desnitrificação
N-amoniacoal	Nitrogênio amoniacoal
Qmed	Vazão média
SBR-ND	<i>Sequencing Batch Reactor</i> com nitrificação e desnitrificação
SBR-NDP	<i>Sequencing Batch Reactor</i> com nitrificação, desnitrificação e remoção biológica de fósforo
SS	Sólidos suspensos
SST	Sólidos suspensos totais
SSV	Sólidos suspensos voláteis
TAS	Taxa de aplicação superficial
TDH	Tempo de detenção hidráulica
UASB	Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo
WA-N	<i>Wetland</i> aerado nitrificante

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Primeiro poço para abastecimento do Rio de Janeiro, escavado em 1561.	18
Figura 2 - Implantação de sistemas de canalização para o abastecimento hídrico no Rio de Janeiro.....	18
Figura 3 - Quadro de William Alexander, The Aqueduct in Rio de Janeiro, 1812.	19
Figura 4 - Despejo de esgoto in natura no Rio das Velhas, em MG.	21
Figura 5 - Despejo de esgoto in natura na Lagoa da Pampulha, em Belo Horizonte, MG.....	21
Figura 6 - Etapas de Tratamento de Esgoto.....	26
Figura 7 - Decantador secundário da Estação de Tratamento de Esgoto Arrudas, em Belo Horizonte - MG	28
Figura 8 - Funcionamento do Reator UASB	30
Figura 9 - Estação de Tratamento de Esgoto do Ribeirão do Onça, em Belo Horizonte - MG	33
Figura 10 - Representação esquemática do funcionamento do sistema MBBR (<i>Moving Bed Biofilm Reactor</i>)	52
Figura 11 - Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) analisada	53
Figura 12 - Imagens aéreas da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) analisada.....	53
Figura 13 - Imagens aéreas da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) analisada.....	54
Figura 14 - Imagens aéreas da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) analisada.....	54
Figura 15 - Fluxograma das etapas líquida, sólida e seca da ETE	56
Figura 16 - Visita técnica à Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) analisada.	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico - 1 Variação da DBO no afluente e efluente da ETE e limite COPAM (agosto/2015 - dezembro/2016).....	59
Gráfico - 2 Variação da DQO no afluente e efluente da ETE e limite COPAM (agosto/2015 - dezembro/2016).....	59
Gráfico - 3 Variação dos sólidos sedimentáveis no afluente e efluente da ETE e limite COPAM (agosto/2015 - dezembro/2016).....	60
Gráfico - 4 Variação dos sólidos suspensos totais no afluente e efluente da ETE e limite COPAM (agosto/2015 - dezembro/2016).....	61
Gráfico - 5 Variação de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) e limite COPAM (agosto/2015 - dezembro/2016).....	62
Gráfico - 6 Variação de nitrogênio amoniacal no afluente e efluente da ETE (agosto/2015 - dezembro/2016).....	62
Gráfico - 7 Variação de fósforo total no afluente e efluente da ETE (agosto/2015 - dezembro/2016).....	63
Gráfico - 8 Gráfico pluviométricos	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatísticas descritivas dos valores de DBO no afluyente, efluente final e respectivas eficiências de remoção, obtidas a partir da série histórica monitorada na ETE	64
Tabela 2 - Parâmetros estatísticos da DQO no afluyente e no efluente final, bem como da eficiência percentual de remoção, calculados com base nos dados operacionais da ETE	65
Tabela 3 - Estatísticas descritivas dos sólidos sedimentáveis (SS) no afluyente, efluente final e da eficiência de remoção, considerando o conjunto de amostras analisadas.....	65
Tabela 4 - Estatísticas descritivas dos sólidos suspensos totais (SST) no afluyente, efluente tratado e eficiência percentual de remoção, conforme a base de monitoramento da ETE	66
Tabela 5- Estatísticas descritivas dos valores de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) no afluyente, efluente final e eficiência de remoção, obtidas a partir do histórico operacional da ETE	67
Tabela 6 - Parâmetros estatísticos das concentrações de nitrogênio amoniacal no afluyente e no efluente final, bem como da eficiência de remoção, segundo dados da ETE.....	67
Tabela 7 - Estatísticas descritivas do fósforo total no afluyente, no efluente final e da eficiência de remoção, com base nos resultados de monitoramento da ETE.....	68
Tabela 8 - Eficiências de remoção dos parâmetros DBO, SST, NTK e fósforo total nas unidades operacionais da ETE (tratamento primário, secundário e terciário), comparando os valores previstos em projeto com os observados em operação.....	69
Tabela 10 - Valores de DBO no afluyente e efluente da ETE no período de agosto/2015 a dezembro/2016	90
Tabela 11 - Valores de DQO no afluyente e efluente da ETE no período de agosto/2015 a dezembro/2016	90
Tabela 12 - Sólidos sedimentáveis no afluyente e efluente da ETE no período de agosto/2015 a dezembro/2016	91
Tabela 13 - Sólidos suspensos totais no afluyente e efluente da ETE no período de agosto/2015 a dezembro/2016.....	92
Tabela 14 - Concentração de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) no afluyente e efluente da ETE	92
Tabela 15 - Concentração de nitrogênio amoniacal no afluyente e efluente da ETE no período de agosto/2015 a dezembro/2016.....	93
Tabela 16 - Concentração de fósforo total no afluyente e efluente da ETE no período de agosto/2015 a dezembro/2016.....	93
Tabela 17 - Dados pluviométricos.....	96

Tabela 18 - Concentração de DQO Afluente (S_0) no período de agosto/2015 a dezembro/2016	98
Tabela 19 - Concentração de DQO Efluente Fornecida (S) no período de agosto/2015 a dezembro/2016	98
Tabela 20 - Concentração de DQO Efluente Calculada (S) com Base na Eficiência Média de Remoção (65%)	99
Tabela 21 - Carga de DQO Convertida em Metano (DQO_{CH_4}) nos Cenários Fornecido e Calculado	100
Tabela 22 - Produção Volumétrica Teórica de Metano ($m^3 CH_4/d$) nos Cenários Fornecido e Calculado	100
Tabela 23 - Produção Volumétrica Estimada de Biogás (m^3/d) nos Cenários Fornecido e Calculado	101
Tabela 24 - Potencial Mensal de Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás (kWh/mês)	102

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	JUSTIFICATIVA	16
4	REFERENCIAL TEÓRICO	18
4.1	Tratamento de esgoto sanitário: panorama e importância	18
4.2	Etapas do tratamento de esgoto e geração de subprodutos.....	25
4.3	Formação e características do biogás	34
4.3.1	Poder Calorífico e Purificação.....	35
4.3.2	Tecnologias de Aproveitamento Energético.....	35
4.4	Etapas bioquímicas da digestão anaeróbia	36
4.5	Benefícios do aproveitamento do biogás no setor de saneamento	38
4.6	Quantificação do volume teórico de produção do biogás.....	40
4.6.1	Balanco de massa da DQO no sistema anaeróbio	41
4.6.2	Estimativa da DQO Efluente	42
4.6.3	Fundamentação estequiométrica da produção de metano	42
4.6.4	Produção volumétrica teórica de metano com correção de temperatura ..	43
4.6.5	Formulação geral da produção de metano segundo Chernicharo (2007) .	43
4.6.6	Produção de Biogás e Potencial Energético	44
4.7	Legislação relacionada ao aproveitamento do biogás	45
4.8	Riscos operacionais e segurança no manejo do biogás	47
5	METODOLOGIA.....	49
5.1	Natureza da pesquisa	49
5.2	Obtenção, Tratamento e Análise dos Dados.....	50
5.3	Caracterização da Estação de Tratamento de Esgoto	51
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58

6.1	Desempenho da Estação de Tratamento de Esgoto	58
6.2	Projeção de cálculos	72
6.2.1	Balanço de massa da DQO no sistema anaeróbio	73
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	79
	REFERÊNCIAS.....	82
	APÊNDICE A	89
	APÊNDICE B.....	95
	APÊNDICE C	97

1 INTRODUÇÃO

A discussão sobre o uso de fontes alternativas de energia tem ganhado cada vez mais espaço, principalmente diante das preocupações com o meio ambiente e com os impactos causados pelo uso intensivo de combustíveis fósseis (Freitas, 2024). A busca por soluções mais sustentáveis e menos agressivas ao planeta tem levado pesquisadores e profissionais de diversas áreas a olharem com mais atenção para práticas que antes não eram consideradas estratégicas. Um exemplo é o tratamento de esgoto sanitário, que tradicionalmente tem como foco principal a saúde pública, mas que também pode ser uma importante fonte de geração de energia limpa por meio do aproveitamento do biogás (Boarati; de Castro, 2024).

A matriz energética brasileira encontra-se historicamente baseada em fontes hídricas, especialmente pela predominância das usinas hidrelétricas na geração de eletricidade (Milanez; Maia; Guimarães, 2021). Embora o país possua amplo potencial hidráulico, observa-se, nos últimos anos, uma redução crescente dos níveis dos reservatórios, consequência de períodos prolongados de estiagem, alterações climáticas e aumento da demanda por energia (Souza *et al.*, 2021). Esse cenário evidencia vulnerabilidades do sistema, reforçando a necessidade de diversificação da matriz, de forma a garantir segurança energética e reduzir a ocorrência de crises hídricas (Silva *et al.*, 2021).

Diante disso, torna-se cada vez mais relevante estimular investimentos em fontes alternativas e renováveis, como energia solar, eólica e biomassa, capazes de complementar a geração hidrelétrica, mitigar impactos ambientais e ampliar a estabilidade do sistema energético nacional (Lins *et al.*, 2022). Além de aumentar a oferta de energia limpa, a diversificação proporciona maior autonomia e resiliência, configurando uma matriz mais sustentável e preparada para o futuro (Motta *et al.*, 2023).

Durante o processo de tratamento do esgoto, especialmente nas etapas em que ocorre a decomposição da matéria orgânica via tratamento anaeróbio, forma-se o biogás. Esse gás é composto principalmente por metano e dióxido de carbono, sendo resultado da digestão anaeróbia realizada por microrganismos (Silva, 2020). Por sua vez, quando coletado e tratado adequadamente, o biogás pode ser utilizado como uma importante fonte de energia, servindo tanto para aquecimento quanto para geração de eletricidade ou, ainda, para ser transformado em biometano, substituindo o gás natural em diversas aplicações. Isso representa uma oportunidade de aproveitamento de resíduos que antes seriam descartados sem uso energético (Souza Filho, 2023).

O aproveitamento energético do biogás traz uma série de benefícios. Além de auxiliar na redução da emissão de gases de efeito estufa, que contribuem para o aquecimento global, o uso do biogás também reduz custos operacionais nas próprias estações de tratamento de esgoto, que podem se tornar energeticamente autossuficientes (Mergenthal *et al.*, 2023). Outro ponto positivo é o incentivo à economia circular, na qual o que antes era considerado apenas resíduo passa a ter valor energético e econômico (Saneas, 2023).

No entanto, apesar das vantagens, essa prática ainda é pouco aplicada de forma ampla no Brasil (UN, 2023). As dificuldades vão desde a falta de infraestrutura nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) até a ausência de políticas públicas que incentivem esse tipo de tecnologia. Ademais, há desafios técnicos, como o tratamento do biogás para remoção de impurezas, e dificuldades relacionadas ao investimento inicial necessário para a implantação dos sistemas (Alcântara, 2022). Esses obstáculos representam barreiras que limitam a implementação dessa tecnologia no Brasil, mantendo o potencial energético do biogás subutilizado (Freddo *et al.*, 2022). Ainda assim, algumas experiências demonstram que é possível implantar esse tipo de aproveitamento de forma eficiente, como em estações de tratamento localizadas em grandes centros urbanos (Borges *et al.*, 2025).

Nesse contexto, o diferencial deste trabalho reside na avaliação integrada da eficiência operacional de uma Estação de Tratamento de Esgoto localizada em Minas Gerais e na estimativa do seu potencial de recuperação de recursos, com ênfase na geração e no aproveitamento energético do biogás, considerando as condições climáticas e operacionais observadas no período de 2015 a 2016. A pesquisa foi complementada por estudo de caso envolvendo visita técnica, análise de dados operacionais públicos e aplicação de cálculos para estimativa da produção de biogás, com base em metodologias como balanço de massa do gás e fatores empíricos, aplicados em planilhas desenvolvidas no Microsoft Excel.

A análise estatística detalhada dos dados, em consonância com os resultados apresentados por Souza *et al.* (2017), demonstrou que a ETE operou majoritariamente sob condições de subcarga orgânica. Tal cenário esteve diretamente associado à expressiva intrusão de águas pluviais na rede coletora, resultando na significativa diluição do esgoto afluente. Em decorrência disso, as concentrações de DBO e DQO apresentaram valores substancialmente inferiores aos previstos em projeto, configurando uma condição operacional distinta daquela originalmente planejada. Embora se trate de um fator externo à unidade de tratamento, seus efeitos sobre o desempenho do sistema são relevantes, uma vez que comprometem a estabilidade da biomassa microbiana e reduzem o potencial de conversão da matéria orgânica em biogás.

Ainda assim, apesar da discrepância entre o potencial máximo teórico estimado e o volume efetivamente passível de recuperação, os resultados indicam que a conversão do biogás em energia elétrica é tecnicamente viável e apresenta relevância operacional para a ETE analisada. Nesse contexto, o aproveitamento energético do biogás configura-se como estratégia promissora para a redução dos custos relacionados ao consumo de energia elétrica, além de contribuir para o fortalecimento da autossuficiência energética da unidade e para a promoção de práticas mais sustentáveis no setor de saneamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica do aproveitamento energético do biogás produzido no processo de tratamento de esgoto sanitário de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) no estado de Minas Gerais, considerando dados reais de operação, histórico de monitoramento, eficiência das etapas de tratamento e o potencial de geração de energia por meio da digestão anaeróbia do lodo.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Compreender, no contexto da ETE estudada, como ocorre a produção do biogás nas diferentes etapas do tratamento de esgoto, com destaque para a digestão anaeróbia;
- b) Calcular o potencial de geração de biogás da estação de tratamento analisada, utilizando balanço de massa, fatores empíricos e fórmulas aplicadas no Microsoft Excel;
- c) Avaliar a eficiência operacional da ETE, com base nos dados históricos de monitoramento (DBO, DQO, SST, vazão, pluviosidade), relacionando-os à produção de biogás;
- d) Comparar as concentrações de DBO e DQO previstas em projeto com os valores observados na operação da ETE, avaliando a influência dos eventos pluviométricos na variação da carga orgânica afluente.

3 JUSTIFICATIVA

O aproveitamento energético do biogás gerado em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) configura-se como uma oportunidade estratégica de elevada relevância para a matriz energética brasileira. Embora a produção nacional de biogás tenha apresentado um crescimento expressivo de 159,45% entre os anos de 2017 e 2022, passando de 1,1 bilhão para 2,8 bilhões de Nm³, esse volume ainda corresponde a apenas 3,3% do potencial técnico estimado de 84,6 bilhões de Nm³/ano (Milanez; Maia; Guimarães, 2021). Tal discrepância evidencia o subaproveitamento de uma fonte energética renovável que, se adequadamente explorada, poderia contribuir de maneira significativa para a segurança energética e a mitigação de impactos ambientais (Mesquita *et al.*, 2021).

A pertinência desta pesquisa é acentuada diante do atual panorama do saneamento básico no Brasil, marcado por profundas desigualdades. Estima-se que aproximadamente 90 milhões de brasileiros ainda não possuem acesso à coleta de esgoto, sendo que 55% do esgoto coletado é descartado sem tratamento adequado nos corpos hídricos. Essa conjuntura compromete não apenas a saúde pública e o equilíbrio ambiental, mas também representa o desperdício de um recurso energético com elevado potencial de recuperação (Rodrigues; da Costa, 2023).

Essa lacuna torna-se ainda mais preocupante diante do panorama sanitário nacional. Em 2022, apenas 62,5% dos domicílios brasileiros estavam conectados à rede de coleta de esgoto, sendo que somente 46% dos efluentes recebiam algum tipo de tratamento. Tal cenário representa não apenas um desafio ambiental e de saúde pública, mas também uma perda significativa de recursos energéticos latentes, frequentemente negligenciados pelas políticas públicas e práticas operacionais em vigor (Costa, 2023). O desperdício desse potencial energético reforça a urgência de estratégias que promovam a transição para um modelo de saneamento ambientalmente eficiente e energeticamente sustentável (Junior; Monteiro; de Melo, 2024).

Nesse contexto, a promulgação do Novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) representa um avanço institucional significativo ao estabelecer metas de universalização até 2033, prevendo o atendimento de 99% da população com abastecimento de água potável e 90% com coleta e tratamento de esgoto. A expansão da cobertura dos serviços implicará, conseqüentemente, aumento da geração de lodo e biogás nas ETEs, ampliando as oportunidades para o aproveitamento energético desses subprodutos. Ademais, o novo marco regulatório reforça princípios de eficiência operacional, sustentabilidade econômico-financeira

e modernização da gestão, criando um ambiente mais favorável à incorporação de soluções inovadoras e à valorização energética do biogás como instrumento de redução de custos e fortalecimento da sustentabilidade do setor.

Justifica-se, portanto, a presente investigação, tendo em vista a necessidade de consolidar conhecimentos técnicos, operacionais e normativos que favoreçam a implementação segura e eficiente de tecnologias de aproveitamento energético do biogás em ETEs. Casos recentes, como o acidente fatal ocorrido em uma unidade de uma companhia de saneamento localizada em Minas Gerais, em que a liberação descontrolada de biogás resultou na morte de um operador, evidenciam a importância de se estabelecer parâmetros técnicos rigorosos para garantir a segurança das operações e mitigar riscos ocupacionais (Onudi, 2021).

Assim, este estudo propõe-se a oferecer contribuição científica relevante ao sistematizar fundamentos teóricos e práticos capazes de subsidiar decisões técnicas e gerenciais voltadas ao uso energético do biogás no setor de saneamento. Espera-se que os resultados obtidos apoiem gestores públicos, engenheiros e formuladores de políticas na elaboração de diretrizes mais eficazes, contribuindo para a ampliação do aproveitamento energético e para a redução do desperdício dos 97% do potencial ainda inexplorado no país, em consonância com as metas de universalização e sustentabilidade estabelecidas pelo Novo Marco Legal do Saneamento.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Tratamento de esgoto sanitário: panorama e importância

A trajetória do saneamento básico no Brasil remonta ao período colonial, quando as ações eram pontuais e limitadas à drenagem de terrenos e instalação de chafarizes, como o primeiro construído na capital em 1744 (Andrade; Lopes, 2021). O marco inicial, por sua vez, data de 1561, quando Estácio de Sá ordenou a escavação do primeiro poço para abastecimento do Rio de Janeiro (Figuras 1 e 2), evidenciando o caráter individualizado e assistemático dessas primeiras iniciativas.

Figura 1 - Primeiro poço para abastecimento do Rio de Janeiro, escavado em 1561.



Fonte: Cedae (2023).

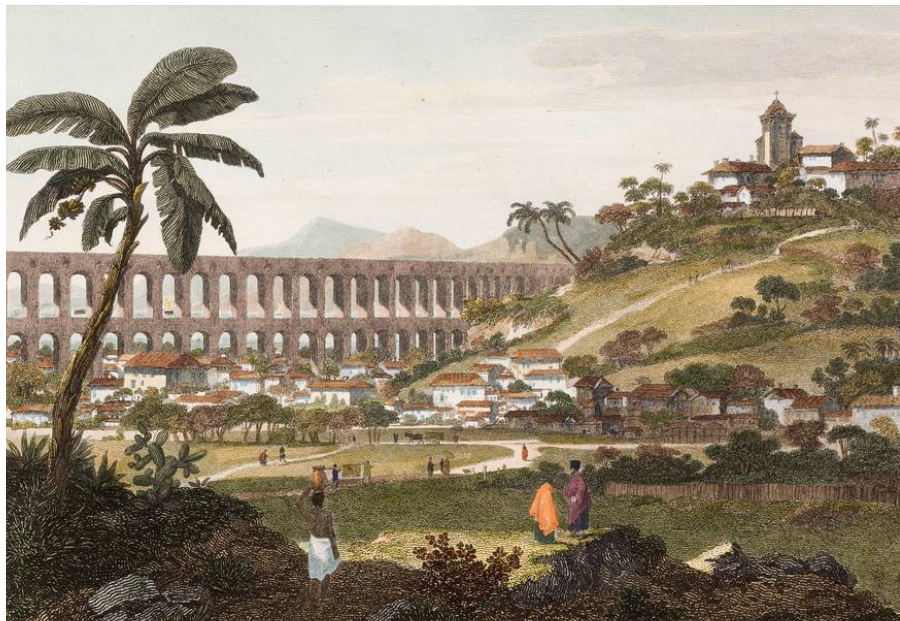
Figura 2 - Implantação de sistemas de canalização para o abastecimento hídrico no Rio de Janeiro.



Fonte: Cedae (2023).

Um dos mais emblemáticos exemplares da engenharia colonial, o Aqueduto da Carioca (Figura 3), atualmente conhecido como Arcos da Lapa, foi construído em 1723 com a finalidade de conduzir água proveniente das nascentes situadas no alto do bairro de Santa Teresa. Com o progressivo processo de poluição do Rio Carioca, tornou-se necessário buscar novas fontes de abastecimento hídrico, o que contribuiu significativamente para o desenvolvimento e expansão da cidade.

Figura 3 - Quadro de William Alexander, The Aqueduct in Rio de Janeiro, 1812.



Fonte: O Globo (2021).

O século XIX inaugurou uma nova fase, marcada pela articulação do país com investimentos privados internacionais em meados do período. Os serviços de saneamento foram organizados e concedidos a empresas estrangeiras no final do século, período em que São Paulo construiu seu primeiro sistema de abastecimento de água encanada entre 1857 e 1877 (von Sperling, 1996). Simultaneamente, outras capitais desenvolveram infraestruturas similares, incluindo a implementação da primeira estação de tratamento com filtros de pressão ar/água do mundo (von Sperling, 1997).

A insatisfação com a eficiência dos serviços prestados pelas concessionárias estrangeiras conduziu à estatização do setor no início do século XX. Essa transição representou o abandono do modelo misto que havia caracterizado o período anterior, no qual participavam tanto o setor público quanto empresas privadas internacionais por meio de concessões em centros urbanos de maior porte (Costa, 2023).

A partir dos anos 1940, estabeleceu-se a comercialização dos serviços sanitários, consolidando-se definitivamente com a instituição do Plano Nacional de Saneamento (PLANASA) em 1971, fundamentado nos princípios de autonomia e autossustentação mediante tarifas e financiamentos (von Sperling, 1997).

Antes da década de 1970 e do marco planificador do PLANASA, o setor caracterizou-se pela flexibilidade na prestação dos serviços durante o período que se estendeu do século XIX até meados do século XX. Embora o PLANASA tenha promovido avanços significativos no abastecimento hídrico, sua ênfase limitada no tratamento de efluentes criou disparidades estruturais que permanecem como desafios contemporâneos do setor (Costa, 2023).

No início do século XX, o saneamento básico estava intrinsecamente ligado à saúde pública, focando na prevenção e controle de doenças sanitárias. Com o crescimento urbano e a industrialização a partir de 1930, houve uma transformação na gestão dos serviços, com a água passando a ser tratada como mercadoria. Isso resultou na comercialização dos serviços de saneamento e no surgimento dos primeiros mecanismos de financiamento para o abastecimento de água (Vilarinho; do Couto, 2023).

Nesse contexto, os dados mais recentes do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2024), referentes ao ano-base 2022, revelam um cenário de lenta evolução no atendimento à população brasileira. Atualmente, o índice de atendimento total de água potável é de 84,9%, o que deixa cerca de 32 milhões de brasileiros sem acesso regular a esse recurso. No que tange ao esgotamento sanitário, o déficit é ainda mais pronunciado: apenas 56% da população possui coleta de esgoto, indicando que aproximadamente 90 milhões de pessoas ainda dependem de soluções precárias ou despejos diretos no meio ambiente (Instituto Trata Brasil, 2025).

A deficiência se agrava na etapa final da cadeia. O tratamento de esgoto no país passou de 51,2% em 2021 para 52,2% em 2022, um crescimento de apenas 1 ponto percentual. Na prática, isso significa que quase metade de todo o esgoto gerado no país não passa por qualquer processo de depuração. Em termos volumétricos, estima-se que mais de 5,2 mil piscinas olímpicas de esgoto sem tratamento continuam sendo despejadas na natureza diariamente (Instituto Trata Brasil, 2025).

O tratamento adequado do esgoto sanitário é fundamental para a proteção ambiental e a saúde pública. Mundialmente, estima-se que cerca de 80% das águas residuárias sejam lançadas no meio ambiente sem qualquer tratamento (Instituto Trata Brasil, 2025). Esse descarte de esgoto *in natura* contamina rios, lagos e aquíferos, afetando ecossistemas aquáticos e contribuindo para a proliferação de doenças de veiculação hídrica (Figuras 4 e 5). Investir em

sistemas de coleta e tratamento de esgoto, portanto, é crucial para reduzir riscos sanitários, prevenir enfermidades e melhorar a qualidade de vida da população (Rodrigues; Raupp, 2023).

Figura 4 - Despejo de esgoto *in natura* no Rio das Velhas, em MG.



Fonte: CBH Rio das Velhas (2021).

Figura 5 - Despejo de esgoto *in natura* na Lagoa da Pampulha, em Belo Horizonte, MG.



Nota: A Lagoa da Pampulha é classificada como um corpo hídrico em estado de eutrofização avançada.

Fonte: CBH Rio das Velhas (2020).

A eutrofização dos corpos hídricos constitui um dos impactos ambientais mais relevantes associados à deficiência dos sistemas de saneamento básico, especialmente no que se refere à coleta e ao tratamento de esgotos sanitários. Trata-se de um processo gradual, porém,

cumulativo, que decorre do aporte excessivo de nutrientes nos ambientes aquáticos, em especial nitrogênio e fósforo, elementos amplamente presentes nos esgotos domésticos. Quando lançados de forma contínua e em concentrações elevadas, esses nutrientes promovem alterações profundas na dinâmica ecológica dos corpos d'água, comprometendo sua qualidade ambiental e seus usos múltiplos (von Sperling, 2014).

No cenário brasileiro, a eutrofização apresenta estreita relação com a histórica insuficiência dos serviços de esgotamento sanitário. Apesar dos avanços observados nas últimas décadas, uma parcela significativa da população ainda não dispõe de coleta e tratamento adequados, resultando no lançamento direto ou indireto de efluentes nos rios, lagos e reservatórios urbanos (Instituto Trata Brasil, 2025). Essa realidade é particularmente crítica em áreas densamente urbanizadas, onde a pressão sobre os corpos hídricos é intensificada pelo crescimento populacional desordenado e pela ocupação irregular do solo (Costa *et al.*, 2022).

Do ponto de vista ambiental, o processo de eutrofização é desencadeado quando a carga de nutrientes supera a capacidade natural de assimilação do ecossistema aquático. O fósforo, frequentemente apontado como nutriente limitante em ambientes de água doce, exerce papel central nesse processo, embora o nitrogênio também contribua de forma significativa, sobretudo em sistemas que recebem aportes contínuos de esgotos sanitários (Chernicharo, 2007). O enriquecimento nutricional favorece o crescimento acelerado de algas e cianobactérias, alterando a transparência da água e interferindo nos processos fotossintéticos naturais.

À medida que ocorre a proliferação excessiva de organismos fotossintetizantes, o sistema aquático passa a apresentar flutuações acentuadas nos níveis de oxigênio dissolvido. Durante o período diurno, a intensa atividade fotossintética pode elevar temporariamente esses níveis; entretanto, no período noturno e, principalmente, durante a decomposição da biomassa algal, há um consumo expressivo de oxigênio, podendo resultar em condições de hipoxia ou até anoxia. Essa redução do oxigênio disponível compromete a sobrevivência de organismos aquáticos sensíveis, como peixes e invertebrados, além de provocar alterações significativas nas cadeias tróficas (von Sperling, 2014).

Outro aspecto preocupante da eutrofização está relacionado à proliferação de cianobactérias potencialmente tóxicas. A presença dessas espécies pode resultar na liberação de toxinas capazes de causar efeitos adversos à saúde humana e animal, restringindo o uso da água para abastecimento público, recreação e irrigação (UN, 2023). Em reservatórios utilizados para abastecimento, esse cenário implica a elevação dos custos de tratamento da água, uma vez que são necessárias etapas adicionais para remoção de algas, controle de sabor e odor e eliminação de compostos tóxicos.

No Brasil, diversos exemplos de corpos hídricos em estado avançado de eutrofização evidenciam a relação direta entre o lançamento de esgotos e a degradação ambiental. A Lagoa da Pampulha, em Belo Horizonte, constitui um caso emblemático, no qual sucessivas intervenções de recuperação não foram suficientes para reverter o quadro de degradação, em grande parte devido à persistência do aporte de cargas orgânicas e nutrientes provenientes da bacia de contribuição (Rodrigues; Raupp, 2023). Esse tipo de situação reforça que ações pontuais, quando não acompanhadas de melhorias estruturais no saneamento, tendem a apresentar resultados limitados ao longo do tempo.

As alterações climáticas também exercem influência significativa sobre os processos de eutrofização. O aumento das temperaturas médias favorece o metabolismo de algas e microrganismos, intensificando a taxa de crescimento algal e acelerando os processos de decomposição da matéria orgânica. Esse contexto potencializa os efeitos negativos da poluição por nutrientes, tornando os corpos d'água ainda mais vulneráveis, especialmente em regiões tropicais e subtropicais (UN, 2023).

Diante desse cenário, o tratamento adequado dos esgotos sanitários assume papel fundamental na prevenção e mitigação da eutrofização. Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) bem projetadas e operadas são capazes de reduzir significativamente as cargas orgânicas e nutricionais lançadas nos corpos receptores, contribuindo para a proteção dos ecossistemas aquáticos (von Sperling, 2014). Contudo, o desempenho dessas unidades pode ser comprometido por fatores externos, como ligações indevidas de águas pluviais na rede coletora, que provocam diluição do esgoto, variações hidráulicas e instabilidade operacional, afetando a eficiência dos processos biológicos (Chernicharo, 2007).

Além disso, em corpos hídricos particularmente sensíveis à eutrofização, torna-se necessária a adoção de etapas adicionais de tratamento voltadas à remoção de nutrientes, como sistemas de nitrificação e desnitrificação para o controle do nitrogênio, bem como processos específicos para remoção de fósforo. Essas estratégias, embora impliquem maiores custos de implantação e operação, mostram-se essenciais para garantir a qualidade ambiental dos corpos receptores e a segurança dos usos múltiplos da água (Lins *et al.*, 2022).

Dessa forma, a eutrofização deve ser compreendida não apenas como um efeito colateral do lançamento de esgotos, mas como um indicativo direto da necessidade de integração entre políticas de saneamento, gestão dos recursos hídricos e planejamento urbano. A universalização do tratamento de esgoto, associada à adoção de tecnologias eficientes e à fiscalização das redes coletoras, constitui condição indispensável para a reversão dos quadros de degradação

ambiental observados em diversos corpos hídricos brasileiros, promovendo a recuperação da qualidade da água e a sustentabilidade dos sistemas aquáticos a longo prazo.

As disparidades regionais no acesso ao tratamento de esgoto no Brasil evidenciam a dimensão do desafio. Enquanto em alguns centros urbanos do Sul e Sudeste a coleta e tratamento de esgoto já atendem a grande parte da população, em muitas cidades das regiões Norte e Nordeste esses serviços atingem uma parcela minoritária dos moradores. Essa desigualdade reflete problemas históricos de investimento e gestão no setor de saneamento (Costa *et al.*, 2022).

Nesse contexto, foi sancionado o Novo Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020), que estabeleceu metas ambiciosas de universalização dos serviços de água e esgoto até 2033 (BRASIL, 2020). No entanto, relatórios indicam que os investimentos atuais, na ordem de R\$ 13,7 bilhões em 2020, são insuficientes para cumprir as metas definidas, evidenciando a necessidade de ampliar os recursos e a eficiência na implantação de projetos de esgotamento sanitário (Rodrigues; Raupp, 2023).

Além de ser imperativo para a saúde pública, o tratamento de esgoto traz benefícios ambientais e climáticos. Sem tratamento, a decomposição anaeróbia da matéria orgânica presente no esgoto gera metano (CH₄) e outros gases de efeito estufa de forma descontrolada. Estima-se que as emissões provenientes das águas residuárias respondam por cerca de 1,57% das emissões globais de gases de efeito estufa, valor equivalente ao impacto climático da indústria de aviação mundial (UN, 2023).

O metano, em particular, possui um potencial de aquecimento aproximadamente 28 vezes maior que o do CO₂ em um horizonte de 100 anos. Dessa forma, tratar o esgoto, sobretudo por meio de processos que capturam e aproveitam o biogás, contribui diretamente para a mitigação da mudança climática, ao evitar a liberação de metano bruto na atmosfera e convertê-lo em uma fonte de energia útil (Nonnenmacher *et al.*, 2023).

A abordagem moderna do saneamento reconhece o esgoto não mais como um resíduo sem valor, mas sim como um recurso a ser aproveitado. Organismos internacionais ressaltam que águas residuárias tratadas deixam de ser um passivo ambiental para se tornar uma fonte de insumos valiosos, como água de reuso, fertilizantes e energia limpa (da Silva *et al.*, 2021).

De fato, o tratamento de esgoto oferece uma “proposta de valor dupla”: além de gerar benefícios ambientais e de saúde, pode trazer retornos econômicos ao possibilitar a reutilização de efluentes em diversos setores e a recuperação de subprodutos úteis. Entre esses subprodutos destaca-se o biogás, uma mistura de gases com conteúdo energético que pode ser convertida em eletricidade, calor ou combustível renovável (Lins *et al.*, 2022).

Por sua vez, a universalização do tratamento de esgoto é uma condição essencial para o desenvolvimento sustentável. Ela melhora a qualidade dos corpos d'água, protege a biodiversidade e elimina focos de contaminação, ao mesmo tempo em que promove justiça social e qualidade de vida nas comunidades atendidas (Lins *et al.*, 2022).

Assim, a integração de tecnologias de valorização de subprodutos, como o aproveitamento energético do biogás gerado nos processos de depuração, alinha o saneamento básico aos princípios da economia circular e da economia de baixo carbono (UN, 2023). Nesse contexto, explorar as possibilidades de uso energético do biogás de esgoto apresenta-se como uma estratégia promissora para simultaneamente tratar e valorizar os resíduos sanitários.

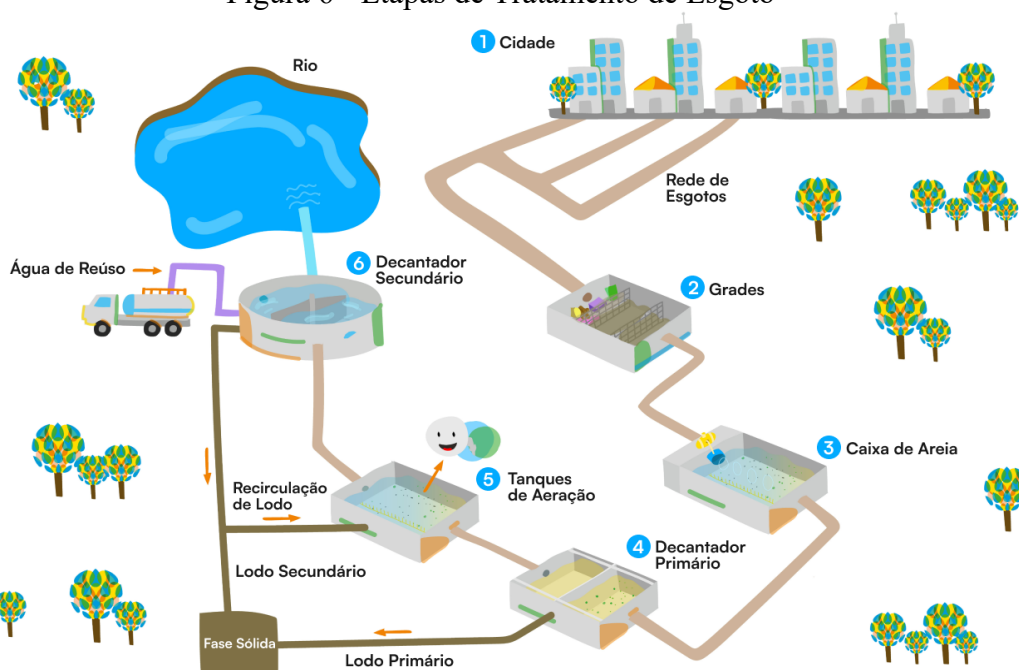
A matriz energética brasileira encontra-se historicamente baseada em fontes hídricas, especialmente pela predominância das usinas hidrelétricas na geração de eletricidade. Embora o país possua amplo potencial hidráulico, observa-se, nos últimos anos, uma redução crescente dos níveis dos reservatórios, consequência de períodos prolongados de estiagem, alterações climáticas e aumento da demanda por energia. Esse cenário evidencia vulnerabilidades do sistema, reforçando a necessidade de diversificação da matriz, de forma a garantir segurança energética e reduzir a ocorrência de crises hídricas.

Diante disso, torna-se cada vez mais relevante estimular investimentos em fontes alternativas e renováveis, como energia solar, eólica e biomassa, capazes de complementar a geração hidrelétrica, mitigar impactos ambientais e ampliar a estabilidade do sistema energético nacional. Além de aumentar a oferta de energia limpa, a diversificação proporciona maior autonomia e resiliência, configurando uma matriz mais sustentável e preparada para o futuro (UN, 2023).

4.2 Etapas do tratamento de esgoto e geração de subprodutos

O tratamento de esgoto compreende uma sequência de etapas físicas (Figura 6), químicas e biológicas destinadas a remover poluentes do efluente bruto, gerando ao final água tratada para descarte ou reúso e resíduos sólidos que requerem manejo adequado. Cada uma dessas etapas produz subprodutos, materiais ou gases resultantes do processo de depuração, os quais historicamente eram considerados indesejados, mas hoje podem ser aproveitados de forma benéfica (Peixoto; Ahmed; Sales, 2021).

Figura 6 - Etapas de Tratamento de Esgoto



Fonte: SABESP (2025).

Em essência, uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) tipicamente gera sólidos sedimentados (lodo), resíduos removidos no pré-tratamento (como detritos e areia) e gases provenientes da decomposição de matéria orgânica, notadamente o biogás nos processos anaeróbios. A gestão integrada desses subprodutos é fundamental para reduzir impactos ambientais e promover a economia circular no saneamento (Saneas, 2023).

A primeira etapa, chamada de tratamento preliminar, visa remover materiais grosseiros do esgoto *in natura*. Nesse estágio ocorrem processos como gradeamento e desarenação. O gradeamento utiliza grades ou peneiras para filtrar objetos e sólidos maiores (plásticos, pedaços de madeira, lixo em geral) que chegam com o esgoto (INCT, 2019). Em seguida, a desarenação promove a sedimentação de areias e partículas minerais, separando esses grãos inertes do fluxo principal (Marques, 2015). Como subprodutos desse pré-tratamento, têm-se os resíduos coletados nas grades (que seguem para aterro sanitário como rejeitos) e a areia removida, a qual também é disposta adequadamente. Embora esses materiais não tenham aproveitamento energético, sua retirada precoce protege os equipamentos e evita o acúmulo de sólidos nas etapas posteriores (INCT, 2019).

Após o preliminar, muitas ETEs contam com um tratamento primário, geralmente em tanques de decantação (decantadores primários). Nessa etapa, parte da matéria orgânica em suspensão sedimenta-se gradualmente, formando o chamado lodo primário no fundo do decantador (Freitas, 2024). Esse lodo primário é um subproduto semilíquido rico em matéria

orgânica bruta. Enquanto o líquido clarificado segue para tratamento biológico, o lodo sedimentado é recolhido para processamento (Saneas, 2023).

Em algumas configurações, pode-se adicionar ainda uma peneira rotativa para reter sólidos remanescentes antes do tratamento biológico, aumentando a eficiência da remoção de partículas. O subproduto principal gerado até aqui é, portanto, o lodo primário, uma mistura de sólidos orgânicos e inorgânicos com alto teor de água, que requer estabilização e destinação adequada (Borges *et al.*, 2025). A fase crucial é o tratamento secundário (Figura 8), de natureza biológica, no qual microrganismos decompõem a matéria orgânica dissolvida no esgoto. Esse estágio pode ocorrer por vias aeróbias (na presença de oxigênio) ou anaeróbias (na ausência de oxigênio), a depender do tipo de processo adotado (Chiavelli *et al.*, 2019).

Conforme Silva (2024, p. 10), nos sistemas aeróbios clássicos como lodos ativados, biofiltros percoladores ou reatores de membrana bactérias degradam a matéria orgânica em tanques de aeração, produzindo gás carbônico (CO₂) e nova biomassa celular. O subproduto principal dos processos aeróbios é o lodo biológico (também chamado lodo secundário), composto pelos microrganismos crescidos e matéria orgânica não degradada. Esse lodo secundário é posteriormente separado no decantador secundário, acumulando-se como resíduo sólido a ser manejado. Já nos processos anaeróbios, como os reatores UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) amplamente usados no Brasil, as bactérias degradam a matéria orgânica sem oxigênio, gerando principalmente CO₂ e metano (CH₄) ou seja, biogás além de um lodo digerido mais estabilizado (Saneas, 2023).

É fundamental distinguir, nesse contexto, as duas principais rotas de produção de biogás em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), a produção via tratamento do esgoto (fase líquida) e a produção via digestão do lodo (fase sólida).

A produção via tratamento do esgoto ocorre diretamente nos reatores biológicos anaeróbios, como o Reator UASB, nos quais o biogás é gerado a partir da degradação da matéria orgânica dissolvida e em suspensão presente no fluxo contínuo do afluente. Nesse caso, a geração de biogás está diretamente vinculada à carga orgânica aplicada (expressa, por exemplo, em termos de DQO) e à vazão de entrada da estação, ocorrendo de forma simultânea ao processo de depuração da fase líquida. O rendimento é, portanto, imediato e proporcional à eficiência de conversão da matéria orgânica removida em metano.

Por outro lado, a produção via tratamento do lodo ocorre em digestores anaeróbios específicos, unidades separadas destinadas à estabilização do lodo primário, secundário ou misto. Diferentemente do esgoto bruto, o lodo apresenta elevada concentração de sólidos orgânicos, o que implica maior carga orgânica por unidade de volume. Como consequência, a

produção de biogás por metro cúbico de reator tende a ser significativamente mais elevada nessa rota. Enquanto o tratamento anaeróbio do esgoto tem como objetivo principal a remoção da carga poluidora da água, a digestão do lodo visa à redução de volume, à estabilização da matéria orgânica e à higienização dos resíduos sólidos.

Essa segunda rota é particularmente comum em sistemas predominantemente aeróbios, como os de lodos ativados, que não produzem biogás durante o tratamento da fase líquida e necessitam encaminhar o lodo excedente para digestão anaeróbia a fim de viabilizar a recuperação energética. Assim, embora ambas as rotas resultem na formação de biogás, diferenciam-se quanto ao substrato processado, à concentração de matéria orgânica, ao objetivo do processo e ao potencial energético específico, sendo a digestão do lodo, em geral, mais intensiva em geração de biogás por volume de reator.

Figura 7 - Decantador secundário da Estação de Tratamento de Esgoto Arrudas, em Belo Horizonte - MG



Fonte: COPASA (2025).

Assim, uma diferença marcante é que, enquanto os sistemas aeróbios consomem energia e produzem mais lodo, os sistemas anaeróbios produzem energia sob forma de biogás e geram menos lodo excedente. Esse biogás, formado principalmente por CH_4 e CO_2 , emerge como um valioso subproduto gasoso do tratamento secundário anaeróbio, podendo ser coletado para aproveitamento energético (Freitas, 2024).

Nesse contexto, destaca-se o emprego de tecnologias que valorizam o uso energético de resíduos, como é o caso dos reatores anaeróbios aplicados ao tratamento de esgotos. Entre eles, o Reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), desenvolvido pelo professor Gatzke Lettinga e sua equipe na Universidade de Wageningen, constitui uma das principais inovações

do tratamento biológico anaeróbio (Chernicharo, 2007). Nessa tecnologia, o afluente é introduzido na porção inferior do reator e escoar em fluxo ascendente por uma manta de lodo composta por microrganismos anaeróbios. Durante esse percurso, a matéria orgânica é degradada pela biomassa, resultando tanto na estabilização do lodo quanto na formação de biogás, rico em metano e dióxido de carbono (Sestrem Junior *et al.*, 2019).

A tecnologia contribuiu significativamente para a disseminação do tratamento anaeróbio devido à sua eficiência, simplicidade operacional, menor produção de lodo e custos reduzidos, sendo amplamente adotada no Brasil e em regiões de clima tropical (Chernicharo, 2007). Para a maximização da produção de biogás, torna-se necessário que o tratamento seja predominantemente anaeróbio.

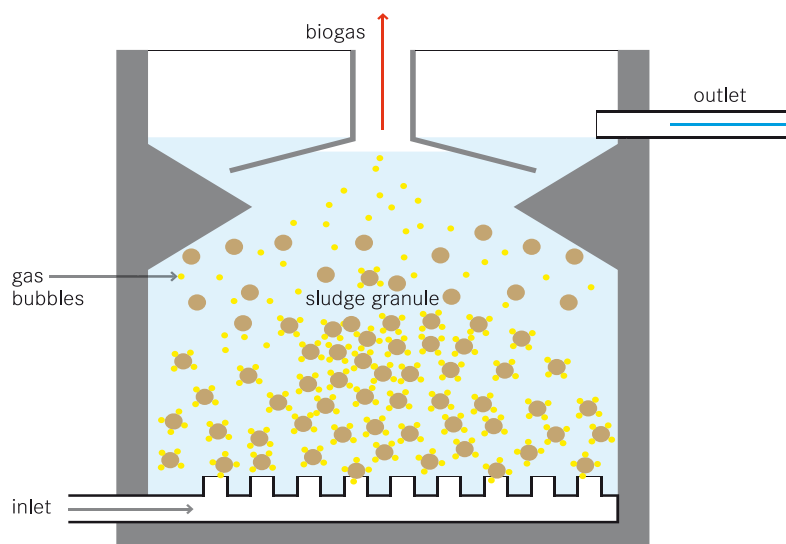
Nesse sentido, os reatores UASB apresentam vantagens expressivas, especialmente em países como o Brasil, cujo clima tropical, marcado por temperaturas médias elevadas durante grande parte do ano, favorece o metabolismo dos microrganismos anaeróbios e o rendimento da digestão (Lima; Passamani, 2012). Em países de clima frio, muitas vezes seria necessário o aquecimento do reator, o que aumentaria significativamente o consumo energético e os custos de operação (Sestrem Junior *et al.*, 2019)

O funcionamento do processo baseia-se na ascensão do esgoto através da manta de lodo, onde ocorre a conversão da matéria orgânica em biomassa e em gases provenientes da atividade microbiana. Na seção superior, dispositivos de separação garantem a adequada segregação das fases sólida, líquida e gasosa, possibilitando, inclusive, a coleta do biogás produzido e posterior aproveitamento energético (Saneas, 2023). Entretanto, apesar de suas vantagens, a eficiência do UASB na remoção de matéria orgânica apresenta valores médios entre 65% e 75%, sendo comum a necessidade de pós-tratamento, geralmente baseado em processos aeróbios, como lodos ativados, filtros biológicos ou *wetlands* construídas (Chernicharo, 2007). Esse polimento final contribui para a adequada remoção de carbono remanescente, sólidos suspensos e, quando necessário, nitrificação, tornando o efluente compatível com padrões de lançamento ou mesmo com futuras possibilidades de reúso (Freitas, 2024).

O lodo excedente proveniente de reatores UASB apresenta um elevado potencial de geração energética. Cañote *et al.* (2021) evidenciaram que este tipo de lodo, por ser mais estabilizado e rico em matéria orgânica prontamente digerível, pode produzir, aproximadamente, 1.000 kWh por ano (em sistemas integrados), demonstrando a importância da escolha tecnológica adequada para maximizar a produção de biogás. Além disso, a menor geração de lodo favorece a viabilidade energética do processo de higienização, contribuindo

para um sistema mais autônomo e sustentável (Junior *et al.*, 2021). A Figura 8 ilustra o funcionamento detalhado desse tipo de reator.

Figura 8 - Funcionamento do Reator UASB



Fonte: Wikipedia (2025).

Cabe destacar que, no Brasil, o emprego da digestão anaeróbia como forma de reduzir a carga orgânica do esgoto tornou-se prática comum ao longo das últimas décadas. Até os anos 1970, esses processos eram basicamente limitados às lagoas anaeróbias, aos decanto-digestores e aos digestores de lodo provenientes do tratamento da fase líquida nas ETEs. Somente no início dos anos 1980 tiveram início os estudos sobre a aplicação do reator de manta de lodo (UASB) no país. Em razão de sua simplicidade construtiva, elevadas eficiências de remoção, produção de lodo já estabilizado e custos reduzidos, essa tecnologia passou a apresentar forte tendência de adoção a partir da década de 1990 (Chernicharo, 2001). Atualmente, praticamente todos os estudos de comparação entre alternativas de tratamento incluem os reatores de manta de lodo como uma das opções prioritárias, dada sua eficiência e viabilidade (Chernicharo, 1997).

Concluído o tratamento biológico, o esgoto já depurado passa por etapas de decantação e clarificação finais (decantador secundário, em sistemas aeróbios, ou pós-tratamentos nos anaeróbios) para remover sólidos remanescentes (INCT, 2019). O efluente tratado resultante (a fase líquida) normalmente é lançado em cursos d'água. Entretanto, a tendência moderna no saneamento é a valorização da água recuperada como recurso. Essa água tratada pode ser considerada um subproduto útil: é a chamada água de reúso, que pode ter destinações benéficas

como irrigação de parques e agricultura, uso em processos industriais ou mesmo recarga de aquíferos, conforme padrões de qualidade exigidos (Tera Ambiental, 2025).

Países desenvolvidos e algumas iniciativas no Brasil já incorporam o reúso do efluente tratado, reduzindo a demanda por fontes de água potável em atividades que toleram água de menor qualidade (Peres *et al.*, 2024). Para regulamentar essa prática, a legislação federal, por meio da Resolução CNRH nº 54/2005, estabelece as diretrizes para a modalidade de reúso não potável, determinando padrões de qualidade específicos para diferentes usos (agrícola, urbano, industrial), solidificando o efluente como um subproduto apto a ser reutilizado de forma segura e ambientalmente vantajosa (Lins *et al.*, 2022).

O lodo de esgoto, englobando tanto o lodo primário quanto o secundário, é um dos principais subprodutos sólidos gerados em uma ETE. Após sua coleta nas etapas de decantação, o lodo passa por um tratamento específico, muitas vezes iniciando com adensamento em centrífugas, para reduzir o volume de água, e seguido de digestão anaeróbia nos casos em que não houve processo anaeróbio anterior (Saneas, 2023). Nessa etapa, a digestão anaeróbia atua como um processo chave, pois, além de gerar biogás, ela estabiliza a matéria orgânica e reduz a carga patogênica. O lodo digerido, denominado biossólido após a desidratação (por filtros prensa, centrífugas ou leitos de secagem), apresenta alto valor como biofertilizante em razão de seu teor orgânico e de nutrientes (nitrogênio e fósforo). Para que possa ser utilizado com segurança na agricultura, o biossólido deve cumprir rigorosamente os critérios de qualidade e monitoramento estabelecidos pela legislação ambiental brasileira, notadamente a Resolução CONAMA nº 375/2006 (Brasil, 2006; Tera Ambiental, 2025).

Diante do exposto, percebe-se que o tratamento de esgoto não visa apenas remover poluição, mas também gera subprodutos que podem ser gerenciados de modo sustentável. Aproveitar o biogás para energia, recuperar a água tratada para reúso e aplicar o biossólido como fertilizante agrícola são pilares da Economia Circular no setor de saneamento, transformando passivos ambientais em recursos valiosos (Moreira *et al.*, 2020).

Nesse contexto, destaca-se o emprego de tecnologias voltadas à valorização energética de resíduos, especialmente os reatores anaeróbios aplicados ao tratamento de esgotos sanitários. A ampla disseminação do reator UASB está associada às suas vantagens operacionais, tais como elevada eficiência na conversão da matéria orgânica, simplicidade construtiva e operacional, baixa produção de lodo excedente e custos reduzidos de implantação e operação quando comparados a sistemas aeróbios convencionais (von Sperling, 2014). Essas características favoreceram sua adoção em países em desenvolvimento, especialmente em

regiões de clima tropical, como o Brasil, onde as condições ambientais são favoráveis à atividade microbiana anaeróbia (Chernicharo, 2007).

Nesse contexto de valorização energética dos subprodutos gerados nas estações de tratamento de esgoto, torna-se pertinente analisar comparativamente unidades com configurações tecnológicas distintas, como a ETE Arrudas e a ETE Onça, ambas localizadas na Região Metropolitana de Belo Horizonte.

A ETE Arrudas caracteriza-se pela utilização de sistema de lodos ativados em seu tratamento secundário, tecnologia de natureza predominantemente aeróbia e, portanto, intensiva em consumo energético, especialmente em razão da necessidade de aeração contínua para manutenção da atividade microbiana. Tal configuração implica elevada demanda elétrica para o funcionamento de sopradores, bombas e demais equipamentos eletromecânicos. Embora sistemas aeróbios apresentem elevada eficiência na remoção de matéria orgânica, produzem maior volume de lodo e consomem energia em vez de gerá-la diretamente no processo biológico.

Em contrapartida, a ETE Onça possui configuração que incorpora reatores anaeróbios do tipo UASB, nos quais a degradação da matéria orgânica ocorre na ausência de oxigênio, resultando na produção de biogás rico em metano. Nessa modalidade, além da estabilização parcial do lodo, há geração de energia potencial sob a forma de gás combustível, o que representa uma vantagem significativa sob a ótica da recuperação energética e da economia circular.

Entretanto, a análise da viabilidade de aproveitamento do biogás deve considerar não apenas o volume produzido, mas também o perfil de consumo energético da estação. Em unidades como a ETE Arrudas, caracterizadas por elevado consumo energético devido ao sistema de lodos ativados, a geração de energia elétrica a partir do biogás para consumo próprio apresenta-se como alternativa tecnicamente adequada e economicamente atrativa. A energia gerada pode compensar parte expressiva da demanda interna, reduzindo custos operacionais e aumentando a autonomia energética da unidade.

Por outro lado, em estações como a ETE Onça, cujo nível de mecanização é relativamente menor e o consumo energético é mais reduzido, a geração de eletricidade exclusivamente para autoconsumo tende a apresentar menor atratividade econômica imediata. Embora o potencial de produção de biogás seja significativo, a baixa demanda interna de energia limita o retorno financeiro direto do investimento em sistemas de cogeração.

Figura 9 - Estação de Tratamento de Esgoto do Ribeirão do Onça, em Belo Horizonte - MG



Fonte: COPASA (2024).

Observa-se, portanto, que a tomada de decisão para implantação de sistemas de aproveitamento energético do biogás permanece fortemente condicionada à viabilidade econômica de curto prazo. Todavia, sob uma perspectiva estratégica alinhada aos princípios da sustentabilidade e às diretrizes do Novo Marco Legal do Saneamento, o aproveitamento do biogás deve ser analisado de forma ampliada, considerando benefícios ambientais, redução de emissões de gases de efeito estufa e fortalecimento da segurança energética do setor.

Assim, sob o ponto de vista econômico-operacional, a ETE Arrudas apresenta maior vantagem para implantação de sistemas de geração de energia elétrica para autoconsumo, devido ao seu elevado consumo energético. Já a ETE Onça, embora tecnologicamente favorável à produção de biogás em função da presença de reatores anaeróbios, pode demandar modelos alternativos de valorização energética, como purificação para biometano, uso térmico ou inserção em arranjos de geração distribuída, de modo a maximizar a viabilidade do aproveitamento.

A análise do desempenho da Estação de Tratamento de Esgoto ao longo do período avaliado evidencia variações nos valores de Demanda Química de Oxigênio (DQO) do esgoto afluente, especialmente em meses caracterizados por elevados índices pluviométricos. Observa-se uma tendência de redução dos valores de DQO durante períodos chuvosos, fenômeno que pode ser explicado, predominantemente, pelo efeito de diluição do esgoto bruto decorrente da entrada indevida de águas pluviais na rede coletora.

A partir da análise conjunta desses dados pluviométricos obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes à Estação Ibirité (Rola Moça), no período de

agosto de 2015 a dezembro de 2016, destaca-se, por exemplo, o mês de janeiro, que apresentou o maior índice de precipitação acumulada e, simultaneamente, os menores valores de DQO registrados no período. Esse comportamento reforça a hipótese de que o aumento do volume de água de chuva contribui para a diluição da carga orgânica do esgoto, reduzindo momentaneamente sua concentração, sem que isso represente, necessariamente, uma melhoria intrínseca na eficiência do sistema de tratamento.

É importante ressaltar que essa condição não está associada a falhas operacionais da Estação de Tratamento de Esgoto, mas sim à ocorrência de ligações irregulares de águas pluviais na rede de esgotamento sanitário, realizadas pela própria população. A rede de esgoto é projetada exclusivamente para o transporte de efluentes sanitários, não sendo dimensionada para receber volumes adicionais provenientes de chuvas. A incorporação indevida dessas águas pode provocar sobrecarga hidráulica no sistema, aumentando o risco de obstruções, extravasamentos, rompimentos de tubulações e impactos ambientais, além de comprometer o desempenho global do tratamento.

Do ponto de vista legal e ambiental, esse tipo de ligação é proibido, configurando infração passível de sanções, uma vez que a água da chuva deve ser corretamente direcionada ao sistema de drenagem pluvial urbana, como sarjetas e bocas de lobo. Assim, a variabilidade observada nos valores de DQO em períodos chuvosos deve ser compreendida como um reflexo das condições externas ao sistema de tratamento, destacando a importância de ações contínuas de educação ambiental, fiscalização e regularização das ligações domiciliares para garantir o funcionamento adequado da ETE e a proteção dos recursos hídricos.

4.3 Formação e características do biogás

O biogás é um gás combustível resultante da decomposição anaeróbia (na ausência de oxigênio) de matéria orgânica por microrganismos (Coelho *et al.*, 2021). Esse processo ocorre em diversos ambientes, desde pântanos e lixões até reatores controlados de tratamento de esgoto, onde bactérias anaeróbias degradam substratos orgânicos como lodos de esgoto sanitário, estrume animal e restos alimentares (Junior; Monteiro; de Melo, 2024).

Trata-se, portanto, de um subproduto intrínseco aos processos biológicos anaeróbios, cujo aproveitamento adequado transforma um passivo ambiental em fonte de energia renovável (Moreira *et al.*, 2020). Como resultado da digestão anaeróbia, o biogás é uma mistura gasosa cuja composição predominante contém metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂).

Em geral, o biogás proveniente de lodos de esgoto contém cerca de 50–70% de CH₄ em volume e 30–50% de CO₂, além de pequenas quantidades de outros gases traço (UN, 2023).

Dentre os componentes minoritários, destacam-se o sulfeto de hidrogênio (H_2S), um gás altamente corrosivo, e o vapor d'água (H_2O) (Souza Filho, 2023).

4.3.1 Poder Calorífico e Purificação

O metano é o componente principal responsável pelo conteúdo energético do biogás. Uma propriedade crucial do biogás é o seu poder calorífico, que é diretamente proporcional ao seu teor de CH_4 (Franqueto *et al.*, 2020). Segundo Dantas, Chaves e Pires (2021), um biogás médio (60% de CH_4) apresenta aproximadamente 55–60% do poder calorífico do gás natural convencional (31-38 MJ/m^3), tornando-o um valioso combustível renovável, apto à geração de calor e eletricidade.

Contudo, a presença de CO_2 e impurezas reduz a eficiência energética do biogás e impõe cuidados no uso. O CO_2 dilui o poder calorífico, enquanto o H_2S , mesmo em concentrações de centenas de partes por milhão, é altamente corrosivo quando combinado com umidade, podendo danificar motores, tubulações e outros equipamentos (Souza Filho, 2023). Por isso, tratamentos de purificação são frequentemente necessários para viabilizar o aproveitamento energético em larga escala (Santiago; Santiago, 2019). Tecnologias como filtros de dessulfurização (remoção de H_2S), sistemas de secagem (remoção de H_2O) e unidades de *upgrade* (remoção de CO_2) são empregadas para melhorar a qualidade do biogás, transformando-o em biometano, conforme a destinação final (Martinez, 2019).

4.3.2 Tecnologias de Aproveitamento Energético

O aproveitamento do biogás em estações de tratamento de esgoto (ETEs) é multifacetado, com tecnologias que buscam maximizar o valor econômico e ambiental deste subproduto. As principais formas de utilização incluem:

- Geração de Energia Elétrica e Térmica (Cogeração): O biogás é queimado em motogeradores, produzindo simultaneamente eletricidade para autoconsumo da ETE e calor. Essa prática permite que as estações alcancem a autossuficiência energética ou até mesmo gerem excedente para injeção na rede (Silva *et al.*, 2023). O calor residual é frequentemente usado para aquecer os biodigestores ou para a higienização térmica do lodo, o que favorece o seu uso seguro na agricultura (Junior *et al.*, 2021).
- Transformação em Biometano: Em aplicações mais avançadas, o biogás é purificado, resultando no biometano. Este gás tem qualidade comparável ao gás natural, podendo ser utilizado como combustível veicular (GNV) ou injetado na rede de gás. Embora essa

prática seja comum na Europa, ela ainda é incipiente no Brasil devido à ausência de marco regulatório específico para injeção na rede (SABESP, 2024).

A produção controlada de biogás ocorre em biodigestores ou reatores anaeróbios, onde fatores como temperatura (faixa mesofílica de 35°C), pH e tempo de retenção são otimizados para maximizar a atividade microbiana metanogênica (Castro *et al.*, 2022). O resultado é a estabilização do resíduo (com redução da carga poluidora e patogênica) e a geração contínua de biogás. Além disso, produz-se o digestato, rico em nutrientes, que pode ser aproveitado como fertilizante agrícola (Santiago; Santiago, 2019). Dessa forma, a digestão anaeróbia contribui para fechar os ciclos de matéria e energia, alinhando-se aos princípios da sustentabilidade.

No contexto do tratamento de esgoto sanitário no Brasil, o uso de reatores UASB é comum devido ao clima tropical e ao menor custo operacional. Esses reatores produzem biogás naturalmente durante a estabilização da matéria orgânica, reforçando o papel do saneamento como fonte de energia limpa (Silva; Júnior; de Matos Cordeiro, 2021). Suas características (elevado teor de metano, geração ininterrupta e possibilidade de purificação) fazem do biogás uma alternativa energética renovável de grande interesse para agregar valor às ETEs (Moreira *et al.*, 2020).

4.4 Etapas bioquímicas da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo biológico complexo e multifásico essencial para a estabilização da matéria orgânica em esgotos e lodos, resultando na produção de biogás. A eficiência desse processo é crucial para a valorização energética dos resíduos urbanos. O processo envolve a atuação sinérgica de um consórcio de microrganismos, distribuídos em quatro etapas sequenciais e interdependentes: hidrólise, acidogênese, acetogênese e, finalmente, metanogênese (Chernicharo, 2007; Silva, 2020).

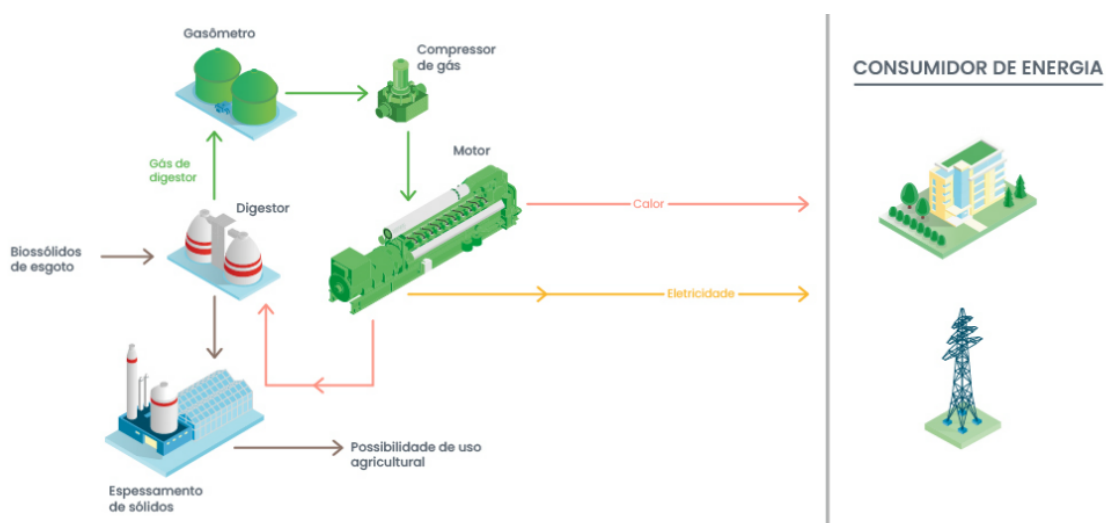
A etapa inicial, denominada Hidrólise, é a taxa-limitante para a digestão de substratos particulados, como o lodo de esgoto. Nela, as macromoléculas orgânicas complexas, como carboidratos, proteínas e lipídios, são quebradas em moléculas menores e solúveis pela ação de enzimas hidrolíticas extracelulares (Chernicharo, 1997). A eficiência da hidrólise é crucial, pois define a quantidade de substrato orgânico disponível para as fases subsequentes, impactando diretamente o rendimento final de biogás. Em sistemas de alta carga orgânica, a otimização desta fase pode ser alcançada por pré-tratamentos térmicos, químicos ou mecânicos do lodo, visando aumentar a biodisponibilidade da matéria orgânica para os microrganismos.

Essa solubilização é o ponto de partida para a bioenergia. Em seguida, o processo avança para a Acidogênese. Nesta fase, bactérias fermentativas convertem os monômeros solúveis

resultantes da hidrólise em compostos de baixo peso molecular, incluindo ácidos orgânicos voláteis (AGVs), álcoois, dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio (H_2) (Vieira; Polli, 2020).

A complexidade reside no fato de que o produto de uma fase serve como substrato para a próxima, exigindo um delicado equilíbrio operacional entre as populações bacterianas e arqueas. A Figura 09 ilustra o fluxo sequencial e a interdependência dessas transformações bioquímicas.

Figura 10 - Modelo de esquema de sistema de cogeração de biogás de esgoto



Fonte: Silva (2020).

A taxa de conversão desta etapa é significativamente mais rápida que a metanogênese, o que confere um risco intrínseco de desequilíbrio ao sistema. O acúmulo de ácidos orgânicos, em particular os ácidos graxos de cadeia longa, é um ponto de atenção crítica. O monitoramento do pH é fundamental, pois a rápida produção de ácidos pode levar à subsequente queda e à inibição dos microrganismos metanogênicos, que são sensíveis a pH abaixo de 6,5 (Junior; Monteiro; de Melo, 2024).

A relação entre a concentração de AGVs e a alcalinidade total do meio é um indicador de desempenho operacional vital nos biodigestores. Quando essa razão se eleva, sinaliza um desequilíbrio entre a produção e o consumo de ácidos, indicando a iminência de uma falha ou de uma redução na produção de metano. Portanto, o controle de alcalinidade, frequentemente ajustado pela recirculação de efluente alcalino, é uma medida fundamental de estabilidade do processo.

A terceira etapa é a Acetogênese. Nesta fase, as bactérias acetogênicas oxidam os ácidos orgânicos maiores (como propionato e butirato) e os álcoois, convertendo-os em acetato, CO_2

e H₂, os substratos preferenciais para a metanogênese. Esta conversão é termodinamicamente desfavorável e exige um estado de simbiose interespecífica. O processo só ocorre de forma satisfatória quando os produtos, especialmente o hidrogênio, são continuamente removidos pelos microrganismos metanogênicos, mantendo a baixa pressão parcial de H₂ no reator (Alcântara, 2022).

Altas concentrações de H₂ inibem a atividade acetogênica, paralisando a cadeia de reações e impedindo a formação dos precursores do metano. A simbiose hidrogenotrófica é um fator determinante para a eficiência da acetogênese, configurando a interdependência entre as bactérias produtoras de acetato e as arqueas consumidoras de hidrogênio.

Finalmente, a Metanogênese representa o estágio crucial, onde o valor energético do biogás é definido. Arqueas metanogênicas utilizam os produtos finais da acetogênese para gerar metano (CH₄) e (CO₂) (Moderno; Santos; Velázquez, 2022). O metano é gerado primariamente pela via acetotrófica (a partir do acetato), responsável por até 70% da produção total, e pela via hidrogenotrófica (utilizando H₂ e CO₂). A sensibilidade das arqueas às flutuações de temperatura e à presença de substâncias inibidoras (como sulfetos e amônia) exige que os reatores operem sob condições de alta estabilidade térmica e físico-química.

A integridade e o equilíbrio da metanogênese são essenciais para a viabilidade do sistema como fonte de energia, uma vez que a concentração final de metano no biogás está diretamente ligada à eficiência dessa etapa. Qualquer inibição compromete a estabilidade do processo e reduz a capacidade da ETE de gerar seu próprio recurso energético. Em suma, o processo anaeróbio deve ser visto não apenas como uma série de reações, mas como um ecossistema microbiano equilibrado, cujo sucesso na conversão de matéria orgânica em metano (vetor energético) depende da harmonia entre os quatro grupos funcionais de microrganismos ao longo destas etapas sequenciais (Chernicharo, 2007).

Portanto, o monitoramento contínuo dos parâmetros operacionais, como a taxa de carga orgânica, temperatura, pH e a relação AGV/Alcalinidade, é mandatório para garantir a produção sustentável e eficiente de biogás, maximizando o potencial de recuperação de recursos do esgoto.

4.5 Benefícios do aproveitamento do biogás no setor de saneamento

O aproveitamento energético do biogás gerado em estações de tratamento de esgoto traz diversos benefícios ambientais, econômicos e operacionais no setor de saneamento básico. Um dos principais ganhos é a geração de energia renovável a partir de resíduos orgânicos, reduzindo a dependência de fontes fósseis e contribuindo para a sustentabilidade do sistema de tratamento

(Lins *et al.*, 2022). O biogás pode ser convertido em eletricidade, energia térmica ou biocombustíveis, como o biometano, transformando um subproduto antes subutilizado em uma fonte estratégica de energia limpa no próprio ambiente operacional da ETE (Freitas, 2024).

Nos tratamentos convencionais de esgoto, o metano produzido pela degradação anaeróbia era liberado ou queimado sem aproveitamento energético, prática que embora reduza as emissões diretas de CH₄, desperdiça seu potencial energético (Freitas, 2024). Ao invés disso, utilizá-lo como fonte renovável ajuda a combater a mudança do clima e atende a objetivos ambientais globais, alinhando-se a metas de redução de emissões pactuadas pelo Brasil, como o compromisso de redução de 30% das emissões de metano até 2030 (Brasil, 2022).

Sob a perspectiva econômica e operacional, a recuperação energética do biogás promove maior eficiência nos serviços de esgotamento sanitário. A eletricidade gerada pode suprir parcial ou integralmente a demanda da própria estação, reduzindo despesas operacionais expressivas com energia elétrica (Abd *et al.*, 2024). Considerando que o consumo energético figura entre os principais custos das companhias de saneamento, tendo alcançado R\$ 7,1 bilhões em 2019, o equivalente a 15,4% do custo operacional do setor no Brasil, a autogeração a partir do biogás pode proporcionar economias substanciais e até viabilizar a autossuficiência energética das unidades (Freddo *et al.*, 2022).

O aproveitamento do biogás também diversifica a matriz energética e aumenta a resiliência do setor de saneamento. Em vez de depender apenas da rede elétrica externa, as estações passam a contar com uma fonte interna de energia renovável, menos sujeita a oscilações de preço ou interrupções de fornecimento (Oliveira *et al.*, 2023).

Esse modelo de geração distribuída contribui para a estabilidade do sistema elétrico local e pode fornecer excedentes à rede (Saneas, 2023). De fato, caso a energia gerada exceda o consumo da ETE, é possível comercializá-la ou obter créditos, conforme regulamentações vigentes, criando uma fonte adicional de receita para o operador do sistema. Além disso, o uso do biogás promove a economia circular, ao reinserir no ciclo produtivo a energia contida nos efluentes tratados, em vez de desperdiçá-la (Borges *et al.*, 2025).

Outra vertente relevante é a produção de biometano a partir do biogás purificado. Com características equivalentes ao gás natural fóssil, porém de origem renovável, o biometano pode ser utilizado como combustível veicular ou para fins urbanos (Lins *et al.*, 2022). No Brasil, destaca-se a experiência da ETE de Franca (SP), operada pela SABESP, que desde 2018 converte o biogás em biometano para abastecer parte da frota de veículos da companhia (SABESP, 2024).

Outros exemplos nacionais reforçam a viabilidade técnica da cogeração a biogás. A ETE Alegria, no Rio de Janeiro, operada pela CEDAE, utiliza o biogás proveniente da digestão anaeróbia do lodo para alimentar uma usina de 215 kW, suprindo parte da demanda energética da unidade. Em Minas Gerais, a ETE Onça, operada pela COPASA, evidencia o potencial de recuperação energética diretamente em reatores UASB, modelo particularmente adequado às condições climáticas tropicais. No Paraná, a ETE Belém, da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), integra a biodigestão do lodo com sistema de cogeração e reaproveitamento do calor na secagem térmica do próprio lodo, otimizando custos de transporte e destinação final.

No cenário internacional, a cogeração (*CHP - Combined Heat and Power*) já constitui prática consolidada. Na Alemanha e na Dinamarca, diversas ETEs alcançam autossuficiência energética por meio da digestão anaeróbia do lodo e do uso do biogás para geração simultânea de eletricidade e calor, este reaproveitado no aquecimento dos digestores. Destaca-se a ETE de Köhlbrandhöft, em Hamburgo, operada pela Hamburg Wasser, referência no conceito de “Fábrica de Recursos” e exemplo de integração entre saneamento e infraestrutura urbana. Outro caso emblemático é a ETE de Strass, na Áustria, reconhecida por produzir cerca de 200% da energia que consome, exportando excedentes à rede elétrica pública. Nos Estados Unidos, a ETE de Stickney, em Chicago, uma das maiores do mundo, também utiliza o biogás da digestão do lodo para geração de energia elétrica e térmica, reduzindo significativamente seus custos operacionais.

Essas experiências demonstram que a recuperação energética do biogás não se restringe a iniciativas experimentais, mas configura-se como prática consolidada em sistemas de saneamento avançados, com elevado potencial de replicação no contexto brasileiro. Em síntese, os benefícios do aproveitamento do biogás no saneamento englobam a redução de impactos ambientais, o ganho de eficiência energética, a economia de recursos e a melhoria da sustentabilidade dos serviços. Além de proteger o clima e gerar energia renovável, essa prática integra as políticas de saneamento com metas de energia limpa e economia circular, agregando valor aos subprodutos do tratamento de esgoto (Santiago; Santiago, 2019). Portanto, tais vantagens reforçam a importância de incorporar a recuperação do biogás nos sistemas de esgotamento sanitário existentes e futuros (Borges *et al.*, 2025).

4.6 Quantificação do volume teórico de produção do biogás

A estimativa do volume teórico de produção de biogás em estações de tratamento de esgoto sanitário baseia-se na conversão da matéria orgânica presente no afluente em metano (CH_4) durante os processos de digestão anaeróbia. Para tal, utiliza-se como parâmetro

fundamental a Demanda Química de Oxigênio (DQO), uma vez que este indicador representa a quantidade de matéria orgânica passível de oxidação química e, portanto, de conversão biológica em energia (Chernicharo, 2007).

A metodologia adotada neste estudo fundamenta-se no balanço de massa da DQO, conforme proposto por Ramos (2008), associado aos princípios estequiométricos apresentados por Metcalf e Eddy (2003) e às equações de conversão volumétrica ajustadas à temperatura operacional do reator, conforme sistematizado por Chernicharo (2007).

4.6.1 Balanço de massa da DQO no sistema anaeróbio

Segundo Lannes (2017), o balanço de massa ideal em estações de tratamento de esgoto deve ser fundamentado em parâmetros operacionais rotineiramente monitorados, de modo a garantir confiabilidade dos resultados e viabilidade operacional. Nesse contexto, Ramos (2008) propõe um balanço de massa simplificado, no qual toda a carga orgânica afluenta ao sistema é distribuída em três frações principais: material orgânico convertido em metano (biogás), material orgânico convertido em lodo retido no sistema e material orgânico remanescente no efluente tratado.

Essa relação é expressa pela Equação (1):

$$DQO_{afl} = DQO_{CH_4} + DQO_{lodo\ ret} + DQO_{efl\ sol} \quad (1)$$

em que:

- DQO_{afl} = carga diária de material orgânico afluenta (kg DQO/d);
- DQO_{CH_4} = carga diária de material orgânico convertida em metano e presente no biogás (kg DQO/d);
- $DQO_{lodo\ ret}$ = carga diária de material orgânico convertida em lodo retido no sistema (kg DQO/d);
- $DQO_{efl\ sol}$ = carga diária de material orgânico solubilizada no efluente tratado (kg DQO/d).

A estimativa da produção de biogás pode ser realizada com base na carga de DQO afluenta aplicada ao reator, a qual é parcialmente convertida em metano durante o processo de digestão anaeróbia. Essa conversão pode ser quantificada por meio da Equação (2):

$$DQO_{CH_4} = Q \cdot (S_0 - S) - Y_{obs} \cdot Q \cdot S_0 \quad (2)$$

em que:

- DQO_{CH_4} = carga diária de material orgânico convertida em metano e presente no biogás (kg DQO/d);
- Q = vazão de esgoto afluente (m^3/d);
- S_0 = concentração de DQO afluente (kg DQO/ m^3);
- S = concentração de DQO efluente (kg DQO/ m^3);
- Y_{obs} = coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO (kg DQO_{lodo}/kg DQO_{apl});

4.6.2 Estimativa da DQO Efluente

A concentração de DQO no efluente do reator anaeróbico foi estimada a partir da eficiência de remoção do sistema. Segundo Chernicharo (2007), podem ser adotadas eficiências médias de remoção de 65% para DQO e 70% para DBO em reatores anaeróbios tratando esgotos domésticos. Dessa forma, a concentração de DQO no efluente foi calculada pela Equação (3):

$$S = S_0 - \frac{E \times S_0}{100} \quad (3)$$

em que:

- S = concentração de DQO ou de DBO efluente (mg/L);
- S_0 = concentração de DQO ou de DBO afluente (mg/L);
- E = eficiência de remoção de DQO ou de DBO (%).

Essa abordagem apresenta vantagem operacional significativa, pois permite a estimativa da produção de metano com base em parâmetros amplamente monitorados nas ETEs, dispensando medições complexas ou onerosas.

4.6.3 Fundamentação estequiométrica da produção de metano

A produção teórica de metano está diretamente relacionada à degradação da DQO, uma vez que o metano representa o principal produto energético da digestão anaeróbia. Conforme apresentado por Metcalf e Eddy (2003), a reação estequiométrica de oxidação completa do metano é dada pela Equação (4):



A partir dessa reação, observa-se que 1 mol de metano (16 g) requer 2 mols de oxigênio (64 g) para sua completa oxidação. Dessa forma, a demanda química de oxigênio equivalente ao metano é de 64 g DQO/mol de CH₄.

Considerando que, em condições normais de temperatura e pressão (0 °C e 1 atm), 1 mol de qualquer gás ocupa um volume de 22,414 litros, obtém-se a relação clássica de conversão de 0,35 L de CH₄ por grama de DQO removida, valor amplamente adotado na literatura técnica.

4.6.4 Produção volumétrica teórica de metano com correção de temperatura

Com base na relação estequiométrica descrita, a produção volumétrica teórica de metano pode ser calculada por meio da Equação (5), conforme Metcalf e Eddy (2003):

$$V_{CH_4} = 0,35 \cdot DQO_{CH_4} \cdot \frac{273+T}{273} \quad (5)$$

em que:

- V_{CH_4} = produção volumétrica de metano (m³/d);
- DQO_{CH_4} = carga de DQO convertida em metano (kg DQO/d);
- T = temperatura operacional do reator (°C).

A correção térmica é necessária, uma vez que o volume dos gases varia em função da temperatura, sendo esta uma condição particularmente relevante em reatores anaeróbios operando em clima tropical.

4.6.5 Formulação geral da produção de metano segundo Chernicharo (2007)

Como alternativa equivalente, e que será adotada nos cálculos da produção estimada, Chernicharo (2007) propõe uma formulação geral para a estimativa da produção volumétrica de metano, expressa pela Equação (6):

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{f(T)} \quad (6)$$

em que:

- Q_{CH_4} = produção volumétrica de metano (m³/d);
- DQO_{CH_4} = carga de DQO convertida em metano (kg DQO/d);
- $f(T)$ = fator de correção dependente da temperatura (kg DQO/m³).

O fator $K(T)$ é calculado por meio da Equação (7):

$$f(T) = \frac{p \cdot K}{R \cdot (273 + t)} \quad (7)$$

em que:

- p = pressão atmosférica (1 atm);
- K = equivalente de DQO por mol de CH_4 (64 g DQO/mol);
- R = constante universal dos gases (0,08206 atm·L/mol·K);
- t = temperatura operacional do reator ($^{\circ}\text{C}$).

4.6.6 Produção de Biogás e Potencial Energético

Embora a produção teórica de metano represente um parâmetro fundamental para a avaliação do potencial energético de uma ETE, esse valor constitui apenas um limite superior estequiométrico. Na prática, a produção efetivamente capturada é inferior, em função de perdas físicas e biológicas inerentes aos reatores anaeróbios, especialmente aos reatores UASB (Chernicharo, 2007).

Uma vez determinada a produção teórica de metano, pode-se estimar a produção total de biogás a partir do teor de metano presente nesse gás, conforme a Equação (8). No caso do tratamento de esgotos domésticos, o teor de metano no biogás situa-se, em geral, entre 70% e 80%.

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{CH_4}}{C_{CH_4}} \quad (8)$$

em que:

- $Q_{biogás}$ = produção volumétrica de biogás (m^3/d);
- Q_{CH_4} = produção volumétrica de metano (m^3/d);
- C_{CH_4} = concentração de metano no biogás, usualmente da ordem de 70 a 80%.

Por fim, o potencial energético foi calculado pela Equação (9).

$$E = Q_{biogás} \times PCI_{biogás} \times Eficiência_{motor} \times dias \quad (9)$$

em que:

- E = potencial de aproveitamento energético (kWh/d);
- $Q_{biogás}$ = produção volumétrica de biogás (m^3/d);

- $Eficiência_{motor}$ = eficiência elétrica dos geradores;
- $dias$ = quantidade de dias de produção.

4.7 Legislação relacionada ao aproveitamento do biogás

O marco legal que rege o aproveitamento do biogás no Brasil tem se desenvolvido nos últimos anos, acompanhando a crescente relevância dessa fonte energética no contexto dos resíduos e do saneamento. Inicialmente, o tema aparecia de forma dispersa em políticas energéticas e ambientais mais amplas (Oliveira *et al.*, 2023). A Política Nacional de Energia (instituída pela Lei nº 9.478/1997, com alterações da Lei nº 11.097/2005) já destacava a importância de utilizar fontes alternativas e renováveis, incluindo biocombustíveis, para diversificar a matriz e mitigar emissões de gases poluentes (Brasil, 1997, 2005).

Posteriormente, a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), estabelecida pela Lei nº 13.576/2017, consolidou o *status* do biogás/biometano como biocombustível estratégico, ao definir diretrizes para aumentar a participação de combustíveis renováveis na matriz e garantir sua oferta em todo o território nacional (BRASIL, 2017). Essa legislação de 2017 criou mecanismos de incentivo, como os créditos de descarbonização (CBIOS), beneficiando produtores de biometano derivado de resíduos urbanos e agroindustriais, e conferindo maior atratividade econômica aos projetos de aproveitamento do biogás (Moreira *et al.*, 2020).

No âmbito específico do saneamento básico, o marco legal também passou a incorporar conceitos de sustentabilidade e aproveitamento de subprodutos. A Lei nº 11.445/2007 (Lei de Diretrizes Nacionais para o Saneamento Básico) e suas atualizações posteriores estabeleceram que os serviços de água e esgoto devem buscar viabilidade econômica e ambiental, estimulando soluções que agreguem valor e eficiência aos sistemas (Brasil, 2007).

Embora essa lei não cite explicitamente o biogás, ela criou um ambiente propício para o seu aproveitamento ao incentivar a eficiência energética e a utilização adequada dos resíduos gerados no tratamento. O recente Marco Legal do Saneamento (Lei nº 14.026/2020) reforçou essas diretrizes ao perseguir a universalização dos serviços até 2033, o que implica expandir muito o tratamento de esgoto no país (Brasil, 2020).

Consequentemente, espera-se um aumento na geração potencial de biogás nas novas ETEs, criando oportunidades para sua valorização energética. Órgãos do setor, como a Associação Brasileira de Biogás (ABiogás), veem na nova lei uma oportunidade de dobrar a

capacidade de produção de biogás oriundo de estações de esgoto, integrando a recuperação energética ao plano de negócios das concessionárias¹.

Além das leis gerais, há regulamentações específicas para o biogás e o biometano que impactam diretamente seu aproveitamento no saneamento. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) editou normativas pioneiras definindo padrões de qualidade para o biometano, viabilizando seu uso seguro (Santiago; Santiago, 2019). A Resolução ANP nº 8/2015 foi a primeira a estabelecer especificações para o biometano combustível, e posteriormente a Resolução ANP nº 685/2017 incluiu controles de qualidade específicos para biometano oriundo de aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto (Rocha, 2023).

Mais recentemente, ambas foram substituídas pela Resolução ANP nº 886/2022, que atualizou e unificou as regras: ela estipula critérios detalhados de composição e pureza do biometano proveniente de resíduos urbanos (lixo e esgoto) para uso veicular e em redes de gás, garantindo a segurança no consumo e na comercialização desse combustível renovável (Rossoni, 2023). Em paralelo, a Resolução ANP nº 906/2022 tratou do biometano de origem agrícola e agroindustrial. Essas normas regulatórias fornecem a base legal para que o biogás gerado em ETEs, quando purificado a biometano, possa ser injetado em redes de gás canalizado ou utilizado em frotas de veículos, obedecendo a padrões de qualidade equivalentes ao gás natural convencional (ANP, 2025).

No campo das políticas de resíduos sólidos e clima, o aproveitamento do biogás também é incentivado. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305/2010, reconheceu a valorização energética de resíduos orgânicos como uma estratégia desejável de gerenciamento, o que impulsionou a expansão de usinas de biogás no país (Rossoni, 2023). Essa lei determinou a eliminação de lixões e a gestão sustentável dos resíduos, induzindo prefeituras e empresas a buscarem soluções como a biodigestão anaeróbia tanto de resíduos urbanos quanto de lodos de esgoto. No contexto das mudanças climáticas, o Brasil assumiu compromissos internacionais, que incluem metas de redução de emissões de metano (Milanez; Maia; Guimarães, 2021).

Cabe mencionar também as normas e padrões técnicos referentes à segurança e qualidade nas plantas de biogás, que embora não sejam leis, possuem caráter normativo. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) tem publicado normas relativas à instalação de sistemas de biogás, qualidade do biocombustível e procedimentos de operação segura –

¹ BIOGÁS E A NOVA LEI DE SANEAMENTO, UMA OPORTUNIDADE PARA O BRASIL? – Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/biogas-e-a-nova-lei-de-saneamento-uma-oportunidade-para-o-brasil/>.

como diretrizes para projetos de biodigestores e para classificação de atmosferas explosivas em instalações de biogás (Silva *et al.*, 2021).

Igualmente, Normas Regulamentadoras de segurança do trabalho (NRs) aplicam-se às unidades de aproveitamento de biogás (por exemplo, NR-20 para inflamáveis, NR-13 para vasos sob pressão, NR-33 para espaços confinados, conforme citado adiante). Essas normas garantem que a implementação do aproveitamento do biogás ocorra de forma alinhada à legislação de segurança industrial e ambiental (Gomes, 2017). Em resumo, o arcabouço legal relacionado ao aproveitamento do biogás evoluiu significativamente na última década no Brasil, combinando políticas de saneamento, resíduos sólidos, energia e clima que incentivam e regulam essa prática (Rodrigues; Raupp, 2023). Leis nacionais estabeleceram diretrizes gerais favoráveis à valorização energética de subprodutos do esgoto, enquanto resoluções específicas (especialmente da ANP) definiram padrões técnicos para uso do biogás/biometano de forma segura e comercialmente viável (ANP, 2025).

4.8 Riscos operacionais e segurança no manejo do biogás

A operação de sistemas de biogás em estações de tratamento de esgoto requer atenção rigorosa à segurança industrial. O biogás é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de gases como sulfeto de hidrogênio (H_2S). Essas substâncias apresentam riscos elevados, como inflamabilidade, toxicidade e asfixia. Os perigos incluem explosões, intoxicações, corrosão de equipamentos e riscos biológicos. Portanto, o manejo seguro do biogás é essencial para evitar acidentes (ONUDI, 2021).

O risco de explosão é um dos mais críticos, devido ao caráter inflamável do metano em contato com o ar. Pequenas concentrações em ambientes confinados já são suficientes para formar atmosferas explosivas (Junior, 2019).

Além do risco de explosão, a exposição a gases tóxicos, como o H_2S , exige monitoramento contínuo. Mesmo em baixas concentrações, esse gás é prejudicial à saúde humana, podendo causar paralisia respiratória. Ele também é corrosivo, danificando estruturas e tubulações metálicas. A instalação de sensores, ventilação forçada e sistemas de dessulfurização do biogás é necessária. Operadores devem usar proteção respiratória adequada e nunca confiar apenas no olfato (Silva; Júnior; de Matos Cordeiro, 2021).

Espacos confinados como digestores, poços de lodo e tanques representam riscos adicionais. O acúmulo de CH_4 e CO_2 pode reduzir o oxigênio e causar asfixia. A Norma Regulamentadora NR-33 exige verificação da atmosfera, ventilação, e presença de vigias

externos. A entrada só deve ocorrer com autorização e uso dos EPIs corretos. A negligência nesse tipo de ambiente é uma das principais causas de acidentes fatais (ONUDI, 2021).

Conforme o estudo de Silva *et al.* (2022), do ponto de vista da engenharia, o biogás demanda materiais resistentes à corrosão, como aço inox e epóxi. O H₂S presente no gás deteriora conexões e superfícies metálicas, podendo causar vazamentos. A manutenção preventiva e inspeções periódicas são fundamentais para detectar falhas. Sistemas de segurança como queimadores de emergência (*flares*) evitam acúmulo de pressão excessiva. Esses elementos garantem a integridade da instalação e a segurança operacional.

O manuseio do lodo residual também expõe os trabalhadores a riscos biológicos. Mesmo após a digestão anaeróbia, o lodo pode conter patógenos como vírus e bactérias. O uso de EPIs, luvas, máscaras e roupas impermeáveis é obrigatório. A higienização adequada após o trabalho e a vacinação dos funcionários reduzem os riscos. Essas medidas asseguram a proteção da saúde dos profissionais envolvidos (Onudi, 2021).

A gestão dos riscos exige o cumprimento das normas técnicas e regulamentadoras. Normas como a NR-10, NR-20, NR-23 e NR-33 abordam aspectos elétricos, inflamáveis, incêndio e espaços confinados (Juliani, 2024). Treinamentos periódicos, simulados de emergência e cultura de segurança são práticas recomendadas. A sinalização adequada e os sensores de gás aumentam a segurança nas instalações. Um plano de gerenciamento de riscos deve ser implementado em todas as ETEs (Barbosa, 2023; Junior, 2019).

Conclui-se que, embora o biogás represente uma solução energética sustentável, seu aproveitamento demanda atenção especializada à segurança (Santiago; Santiago, 2019). A adoção de boas práticas, o uso de materiais adequados e o treinamento das equipes são imprescindíveis. Assim, é possível evitar explosões, intoxicações, falhas operacionais e doenças ocupacionais. A gestão segura do biogás fortalece a viabilidade técnica e ambiental do saneamento (Moderno; Santos; Velázquez, 2022; Silva; Konrad; Callado, 2022).

5 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo foi organizada de forma a abranger tanto a revisão teórica quanto as etapas práticas necessárias para estimar o potencial de produção de biogás em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). O delineamento metodológico seguiu uma lógica sequencial, iniciando-se pela revisão bibliográfica e avançando para a coleta e o processamento dos dados por meio de ferramentas computacionais, especialmente o *software* Microsoft Excel, utilizado na montagem das planilhas de cálculo e na elaboração de gráficos e tabelas.

5.1 Natureza da pesquisa

No que se refere à abordagem metodológica adotada neste estudo, a investigação pauta-se, predominantemente, pela perspectiva qualiquantitativa, pois a análise do potencial de geração de biogás em uma Estação de Tratamento de Esgoto envolve a interpretação dos fenômenos operacionais, das condições ambientais e das práticas técnicas que não podem ser reduzidas exclusivamente a valores numéricos.

Todavia, devido à necessidade de realizar cálculos de eficiência, balanço de massa e estimativas da produção de biogás, etapas fundamentais para a determinação do potencial energético do metano, a pesquisa também incorpora elementos quantitativos, sobretudo no tratamento dos dados coletados durante a visita técnica, nos parâmetros operacionais disponibilizados publicamente pela ETE e nos cálculos efetuados no *software* Microsoft Excel.

Nesse sentido, segundo Proetti (2017):

[...] o pesquisador conduz seu trabalho a partir de um plano estabelecido *a priori*. Preocupa-se com a medição objetiva e a quantificação dos resultados. [...] tem por objetivo demonstrar, de forma quantificada, a importância dos dados coletados em uma verificação. [...] Trata-se de mensurar para comprovar medidas de forma precisa e confiável (Proetti, 2017, p. 7-8).

Assim, a combinação das abordagens qualitativa e quantitativa torna-se coerente com o objeto da pesquisa, uma vez que o estudo envolve tanto a compreensão técnica do funcionamento da ETE quanto à quantificação do potencial de produção de biogás. Enquanto a etapa qualitativa permite interpretar as práticas operacionais observadas na visita técnica, a vertente quantitativa possibilita transformar dados de DQO, vazão e eficiência de remoção em estimativas numéricas de geração de metano.

No caso deste trabalho, compreender como o biogás é produzido, perdido ou subaproveitado exige interpretação técnica e operacional. Além disso, estimar sua geração potencial demanda cálculos estruturados. Essa complementaridade atende ao objetivo da

pesquisa, que busca compreender “como” se dá a produção de biogás e “quanto” de metano pode ser efetivamente gerado, mantendo alinhamento com os referenciais metodológicos (Yin, 2015).

Por conseguinte, a pesquisa apresenta natureza descritiva, uma vez que se propõe a identificar, caracterizar e detalhar o processo de geração de biogás na ETE analisada, descrevendo parâmetros operacionais, comportamento do reator anaeróbio, eficiência de remoção e estimativas de produção de metano calculadas a partir do balanço de massa.

Segundo Silva e Menezes (2000):

[...] a [natureza] descritiva visa descrever as características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Envolve o uso de técnicas padronizadas de coleta de dados: questionário e observação sistemática. Assume, em geral, a forma de levantamento (Silva; Menezes, 2000, p. 21).

Dessa forma, a presente metodologia combina observação direta (visita técnica), levantamento de dados secundários (valores públicos da ETE), cálculos experimentais (Excel) e análise interpretativa, constituindo um conjunto de procedimentos consistente com o objetivo de estimar o potencial energético do biogás no contexto do saneamento em Minas Gerais.

5.2 Obtenção, Tratamento e Análise dos Dados

A obtenção dos dados fundamentou-se em três fontes principais. Em primeiro lugar, foi realizada uma visita técnica à Estação de Tratamento de Esgoto em 06 de outubro de 2025, o que permitiu observar as condições estruturais e operacionais da unidade, compreender o funcionamento dos reatores anaeróbios e dialogar com os operadores responsáveis pelo sistema. Em complemento, foram consultadas bases públicas, relatórios técnicos e trabalhos acadêmicos que disponibilizam parâmetros operacionais da ETE, incluindo características do esgoto, valores de DQO afluente e efluente, eficiência de remoção, vazão e dados sobre o lodo gerado. O tratamento e a análise dos dados seguiram uma abordagem sistemática. Inicialmente, os dados base foram organizados, incluindo valores de DQO afluente e efluente, eficiência de remoção, vazão e temperatura operacional. Em seguida, foram realizadas as conversões necessárias para aplicação das equações de balanço de massa.

Esses cálculos foram conduzidos com base na metodologia apresentada por Ramos (2008) e Chernicharo (2007), permitindo determinar as frações de DQO convertidas em biogás, em lodo e as remanescentes no efluente. A estimativa teórica de produção de metano foi

calculada utilizando o fator estequiométrico de 0,35 L CH₄ por grama de DQO removida, aliado às equações de correção de temperatura e ao fator K(T).

O Microsoft Excel foi utilizado para estruturar as planilhas, organizar as variáveis, automatizar fórmulas e gerar gráficos e tabelas comparativas. A análise crítica dos resultados envolveu a comparação entre produção teórica e perdas usuais de metano, confrontando valores estimados com o desempenho real da estação e avaliando as diferenças entre os métodos aplicados, como estequiometria, balanço de massa e fatores empíricos.

Após o processamento dos dados, procedeu-se à interpretação qualitativa dos resultados, considerando categorias como potencial energético do biogás, eficiência dos processos anaeróbios, benefícios ambientais decorrentes da captura de metano, limitações operacionais observadas e barreiras tecnológicas e econômicas que influenciam a adoção desse aproveitamento energético. Essa etapa permitiu desenvolver uma compreensão sobre as possibilidades reais de utilização do biogás gerado na ETE analisada, oferecendo informações para futuras implementações de aproveitamento energético no estado de Minas Gerais.

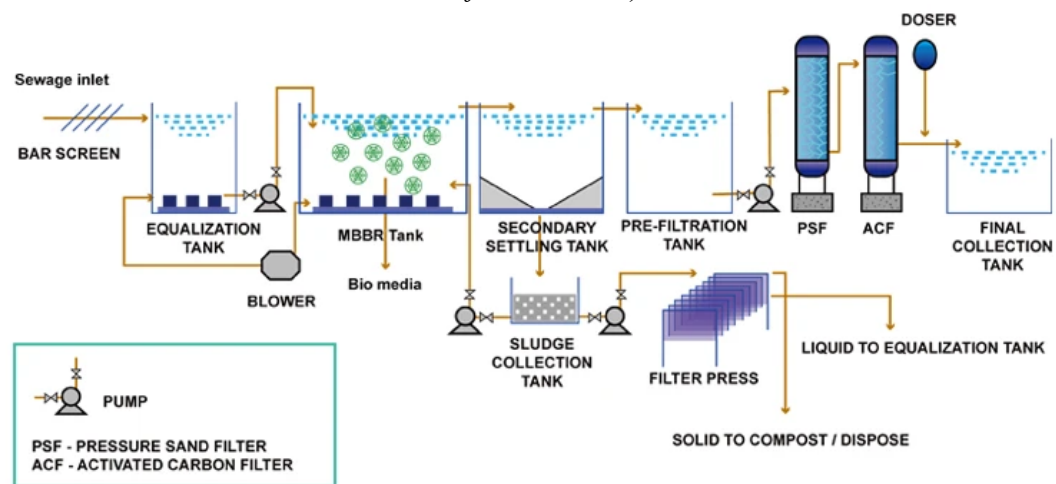
5.3 Caracterização da Estação de Tratamento de Esgoto

A Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) analisada neste estudo, localizada no estado de Minas Gerais, foi implantada com a tecnologia de lodos ativados associada ao sistema MBBR (*Moving Bed Biofilm Reactor*). O sistema de lodos ativados é amplamente empregado em escala mundial, especialmente em contextos que demandam efluentes de elevada qualidade e apresentam restrições de área para implantação das unidades de tratamento. De acordo com von Sperling (2005), os avanços tecnológicos trouxeram novas perspectivas para esse processo, destacando-se a incorporação de leitos móveis como meio suporte ao crescimento da biomassa. Trata-se de um processo biológico amplamente utilizado no tratamento de efluentes domésticos e industriais, no qual microrganismos aeróbios degradam a matéria orgânica presente na água residuária, promovendo sua estabilização.

O sistema MBBR (Figura 10) baseia-se na utilização de suportes móveis, ou mídias, que funcionam como substrato para o desenvolvimento do biofilme microbiano. Seu princípio de funcionamento consiste em maximizar a superfície disponível para o crescimento da biomassa. As mídias favorecem a formação de biofilmes que aumentam a produtividade do sistema e intensificam os processos de biodegradação, atuando como filtros biológicos capazes de reduzir a concentração de amônia e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) do efluente tratado.

Essas mídias podem ser confeccionadas em diversos materiais e formatos, como cilindros lisos ou ranhurados, cubos, esferas, cerâmicas porosas, esponjas, discos ou polietileno, e permanecem em constante movimento no interior do reator, promovido pela aeração (em sistemas aeróbios) ou por agitadores mecânicos (em sistemas anóxicos ou anaeróbios). Essa movimentação assegura uma elevada concentração de biomassa ativa e, conseqüentemente, maior eficiência na decomposição da matéria orgânica e na conversão de compostos nitrogenados, permitindo o uso de reatores de menor volume e maior confiabilidade operacional.

Figura 10 - Representação esquemática do funcionamento do sistema MBBR (*Moving Bed Biofilm Reactor*)



Fonte: Snowate (2021).

No caso da ETE em estudo (Figura 11 - 14), embora tenha sido inicialmente implantada com a associação da tecnologia de lodos ativados ao sistema MBBR, essa configuração não se mantém atualmente. O sistema de mídias apresentava dimensões reduzidas, o que comprometeu seu desempenho e impediu a obtenção dos resultados esperados. Assim, o módulo MBBR foi desativado, e a unidade passou a operar como um reator convencional de lodos ativado.

Figura 11 - Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) analisada



Fonte: Assembleia Legislativa de Minas Gerais (2024).

Figura 12 - Imagens aéreas da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) analisada



Fonte: Concessionária Responsável pela ETE (2024).

Figura 13 - Imagens aéreas da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) analisada



Fonte: Google Earth (2025)

Figura 14 - Imagens aéreas da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) analisada



Fonte: Google Earth (2025).

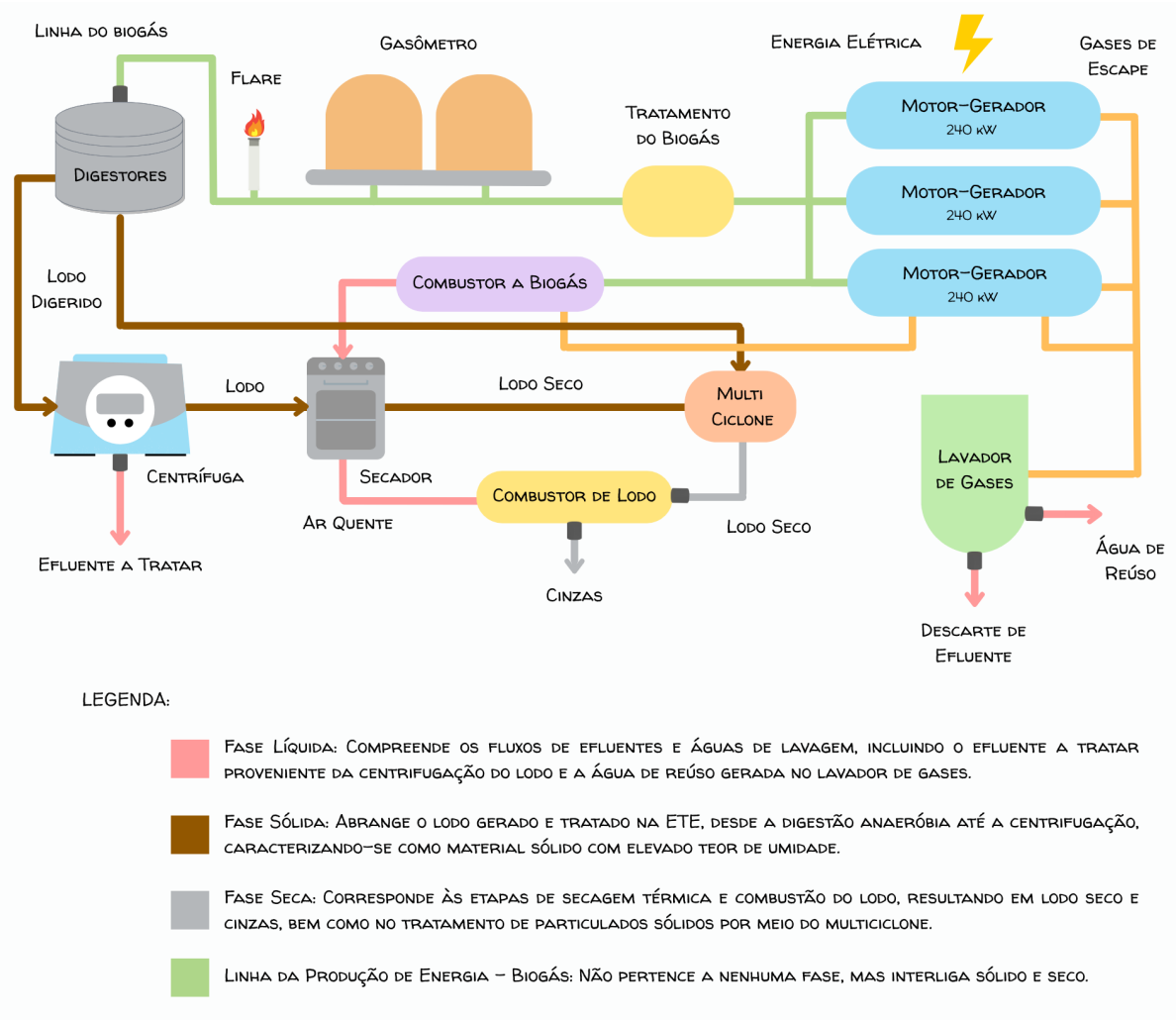
A Estação de Tratamento de Esgoto em questão possui capacidade instalada para tratar uma vazão de 140,0 L/s. O projeto da ETE foi concebido para o tratamento da fase líquida, contemplando inicialmente o tratamento preliminar dos esgotos, composto pelas etapas de gradeamento, desarenação e peneiramento. Em seguida, o efluente é direcionado à decantação primária e, posteriormente, ao processo biológico de lodos ativados, configurado para possibilitar, simultaneamente, a remoção de matéria orgânica (DBO), a nitrificação e a desnitrificação biológica, finalizando com a decantação secundária.

O tratamento terciário é constituído por um processo físico-químico destinado à remoção de fósforo, incluindo as etapas de precipitação, floculação, sedimentação e filtração, além da desinfecção final por radiação ultravioleta (UV).

Para o tratamento da fase sólida, o projeto contempla o adensamento por gravidade do lodo primário, o adensamento por flotação dos lodos secundário e terciário, seguido pela digestão anaeróbia, desaguamento do lodo digerido por centrifugação e, por fim, a secagem térmica do lodo centrifugado. Esta sequência de estabilização do lodo é crítica, pois o processo de digestão anaeróbia não apenas reduz o volume e a patogenicidade do lodo, transformando-o em um digestato estável, mas também é a etapa central para a recuperação de energia.

O biogás gerado no processo de digestão anaeróbia é aproveitado em um sistema de captação e purificação acoplado ao biodigestor de lodo, sendo utilizado para geração de calor e energia elétrica. O sistema de geração é composto por três grupos motogeradores, com potência instalada de 240 kW cada, totalizando 720 kW de capacidade instalada. A energia produzida é destinada ao autoconsumo da própria estação, posicionando a ETE como um exemplo de unidade de recuperação de energia dentro dos princípios de sustentabilidade e economia circular. O fluxo de produção do biogás na unidade está esquematizado na Figura 15.

Figura 15 - Fluxograma das etapas líquida, sólida e seca da ETE



Fonte: Elaborado pela autora (2026), adaptado de Junior (2019).

Sendo assim, a visita técnica realizada à Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) permitiu compreender de forma prática o funcionamento das unidades operacionais, bem como observar as etapas do tratamento da fase líquida, sólida e seca. Essa observação direta complementou a revisão bibliográfica na análise do potencial de produção de biogás. A Figura 16 apresenta um registro fotográfico dessa visita.

Figura 16 - Visita técnica à Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) analisada



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Desempenho da Estação de Tratamento de Esgoto

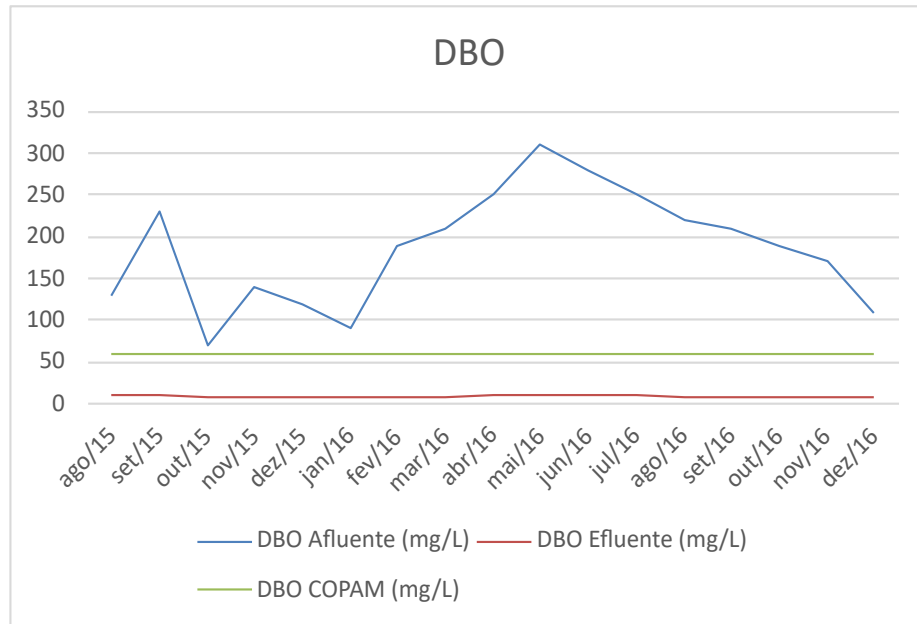
A avaliação do desempenho operacional da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) foi realizada com base no histórico de monitoramento dos principais parâmetros físico-químicos do efluente, **delimitada pelo período de agosto de 2015 a dezembro de 2016 em função da disponibilidade de dados públicos da unidade**. Os dados analisados compreendem medições de DBO, DQO, sólidos sedimentáveis, sólidos suspensos totais, nitrogênio total Kjeldahl (NTK), nitrogênio amoniacal e fósforo total, permitindo caracterizar a eficiência do sistema em cada etapa do tratamento.

Os Gráficos 1 a 7, apresentados a seguir, foram elaborados com base nos dados de monitoramento operacional da ETE (**disponíveis para consulta detalhada no Apêndice A**) e organizados de modo a evidenciar as tendências mensais, as variações sazonais e a eficiência de remoção frente aos limites estabelecidos pela COPAM (2022). Os resultados obtidos demonstram um desempenho expressivo no tratamento de carga orgânica, nutrientes e demais contaminantes, resultando em um efluente final com qualidade superior aos parâmetros fixados pela legislação aplicável, o que reafirma a eficácia operacional do sistema.

Conforme ilustrado no Gráfico 1, os valores de DBO no afluente oscilaram entre 70 mg/L e 310 mg/L, refletindo a variabilidade típica do esgoto em função de fatores sazonais e das características da bacia contribuintes. No efluente, porém, as concentrações mantiveram-se entre 7 mg/L e 11 mg/L, apresentando redução superior a 90% em todos os meses avaliados.

O limite da COPAM (60 mg/L) foi atendido em todo o período, com valores do efluente cerca de seis vezes menores que o permitido. Essa consistência indica eficiência elevada dos processos de tratamento biológico, mesmo nos meses de maior carga orgânica, como maio e junho de 2016. A estabilidade do efluente demonstra bom funcionamento da biomassa, ausência de sobrecarga e adequada operação das unidades de tratamento (Ferreira, 2016; Montenegro, 2022).

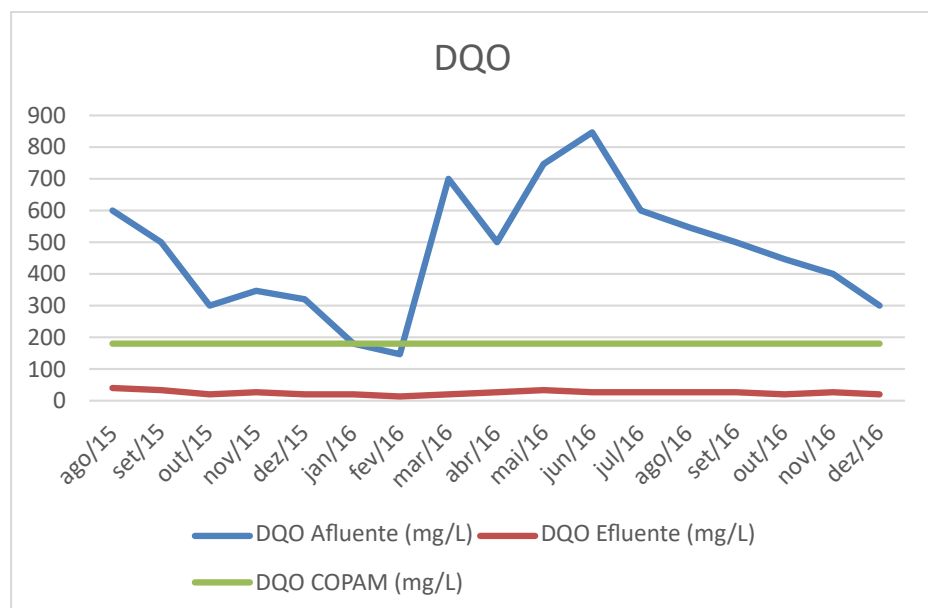
Gráfico - 1 Variação da DBO no afluente e efluente da ETE e limite COPAM (agosto/2015 - dezembro/2016)



Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Por sua vez, a DQO do afluente apresentou amplitudes maiores, variando entre 150 mg/L e 850 mg/L, caracterizando cargas orgânicas e picos acentuados, como nos meses de março/2016, maio/2016 e junho/2016, conforme ilustrado no Gráfico 2. Ainda assim, o efluente manteve valores entre 15 mg/L e 40 mg/L, sempre muito abaixo do limite de 180 mg/L estipulado pela COPAM.

Gráfico - 2 Variação da DQO no afluente e efluente da ETE e limite COPAM (agosto/2015 - dezembro/2016)

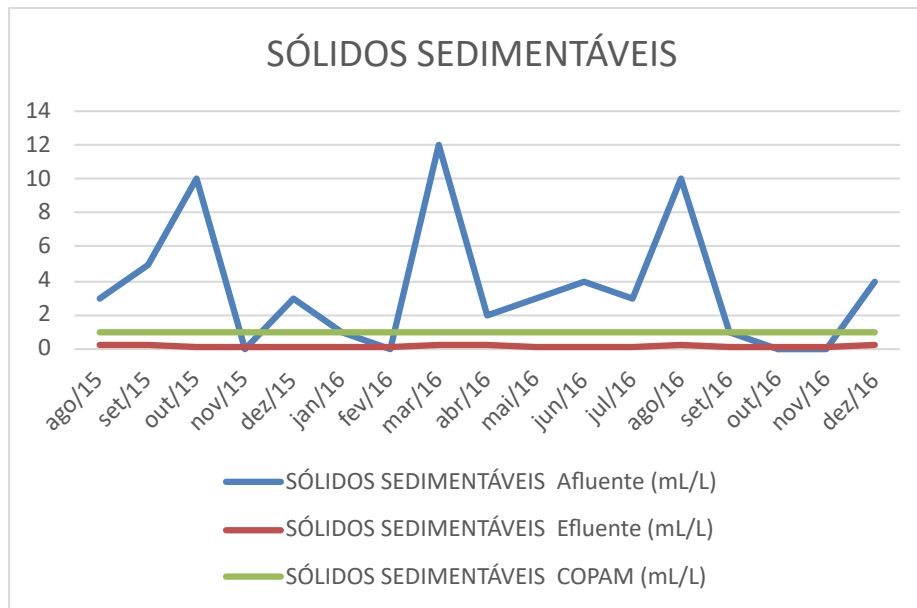


Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

A remoção média foi superior a 90%, reforçando a robustez do sistema para oxidar matéria orgânica biodegradável e não biodegradável. A relação DBO/DQO ao longo do período confirma a consistência da eficiência biológica, com baixas oscilações mesmo diante de flutuações de carga no afluente.

No que tange aos sólidos sedimentáveis, os valores no afluente variaram de 0 a 12 mL/L, com picos nos meses de outubro/2015, março/2016 e agosto/2016, conforme ilustrado no Gráfico 3. Já no efluente, os valores foram extremamente baixos e estáveis, sempre entre 0,1 e 0,2 mL/L, inferiores ao limite de 1 mL/L estabelecido pela COPAM. Esses valores refletem condições adequadas de decantação e ausência de arraste de sólidos, indicando boa operação das unidades de sedimentação e adequado controle da taxa de aplicação hidráulica (Ferreira, 2016; Montenegro, 2022, Lima; Passamani, 2012).

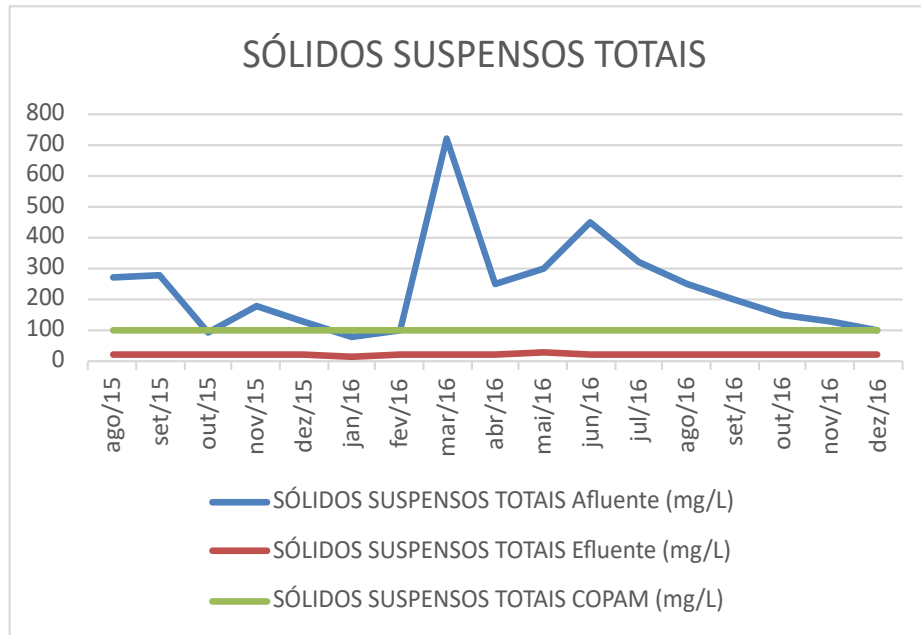
Gráfico - 3 Variação dos sólidos sedimentáveis no afluente e efluente da ETE e limite COPAM (agosto/2015 - dezembro/2016)



Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Conforme ilustrado no Gráfico 4, os sólidos suspensos totais no afluente oscilaram entre 80 mg/L e 720 mg/L, evidenciando a heterogeneidade da carga particulada do esgoto bruto e a presença de picos sazonais significativos. No efluente, entretanto, as concentrações permaneceram entre 15 mg/L e 25 mg/L, atendendo ao limite de 100 mg/L da COPAM. A eficiência média de remoção ultrapassou 85%, indicando boa performance dos processos de decantação e retenção de sólidos biológicos, sem episódios de *wash-out* ou perda significativa de lodo.

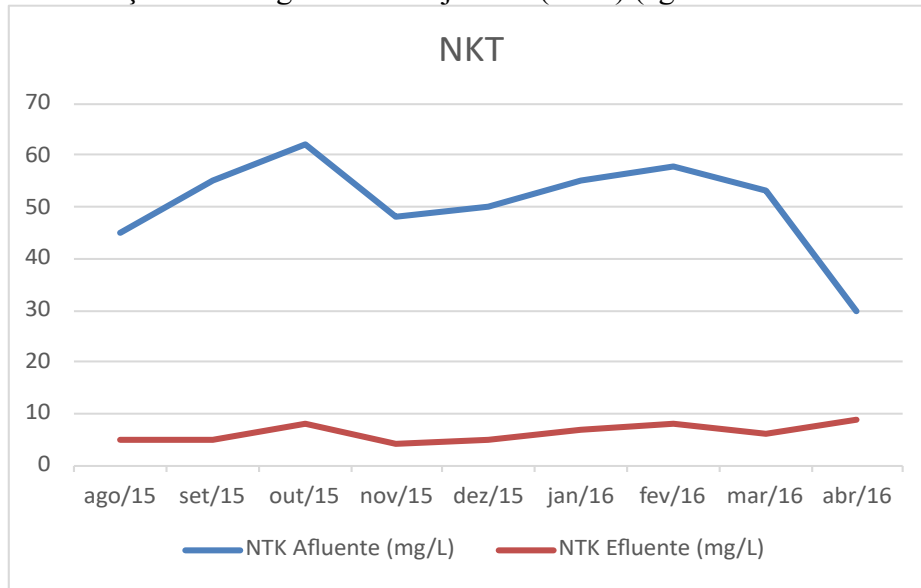
Gráfico - 4 Variação dos sólidos suspensos totais no afluente e efluente da ETE e limite COPAM (agosto/2015 - dezembro/2016)



Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

No caso do NTK, os valores afluentes variaram entre 30 mg/L e 62 mg/L, enquanto o efluente permaneceu entre 4 mg/L e 9 mg/L, conforme ilustrado no Gráfico 5. Tais resultados demonstram uma remoção eficiente da fração orgânica nitrogenada pelo sistema. A queda dos valores indica boa performance da nitrificação e da incorporação de nitrogênio pela biomassa, embora se note uma leve elevação no efluente entre mar/16 e abr/16, possivelmente relacionada a variações de temperatura ou carga (Ferreira, 2016; Montenegro, 2022).

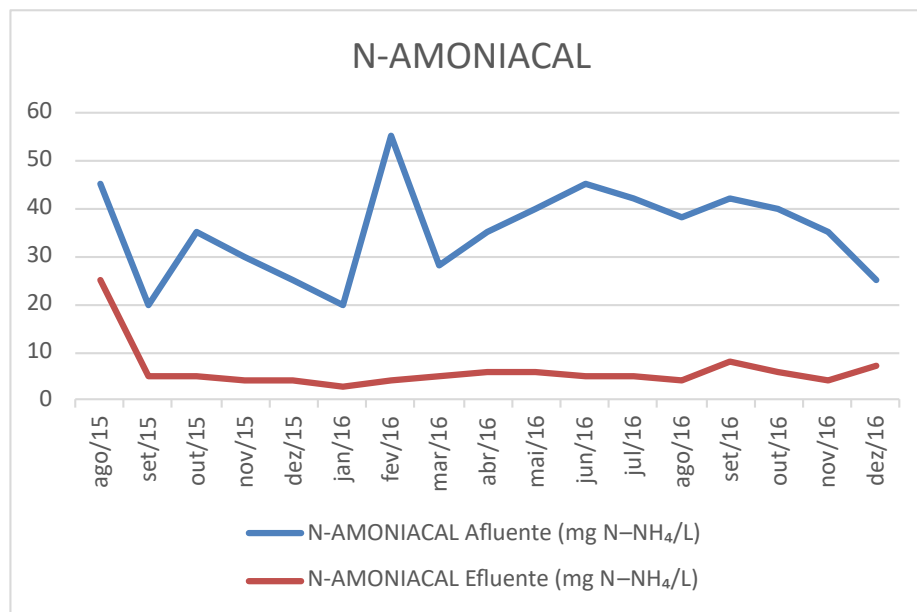
Gráfico - 5 Variação de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) (agosto/2015 - dezembro/2016)



Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Conforme ilustrado no Gráfico 6, o nitrogênio amoniacal no afluente oscilou entre 20 mg/L e 55 mg/L, com picos em fevereiro/16 e junho/16. No efluente, os valores variaram de 3 mg/L a 8 mg/L, indicando remoção eficiente mesmo nos períodos de maior carga. O comportamento do efluente demonstra que o processo de nitrificação se manteve ativo durante praticamente todo o período, sem indícios de inibição por temperatura, toxidez ou sobrecarga orgânica.

Gráfico - 6 Variação de nitrogênio amoniacal no afluente e efluente da ETE (agosto/2015 - dezembro/2016)

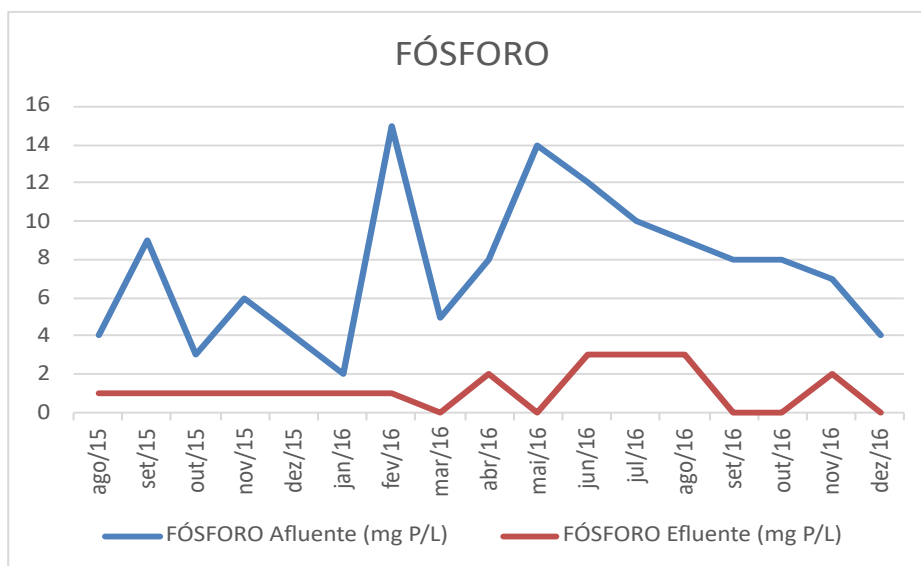


Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Por fim, as concentrações de fósforo no afluente variaram entre 2 mg/L e 15 mg/L, refletindo padrões típicos de esgoto. No efluente, as concentrações variaram de 1 mg/L a 3 mg/L, demonstrando redução, embora menor que a observada para os compostos nitrogenados, conforme ilustrado no Gráfico 7.

Essa faixa de valores é coerente com sistemas convencionais de tratamento, nos quais a remoção de fósforo depende de remoções físicas e biológicas, sem etapas específicas de precipitação química. Ainda assim, a estabilidade do efluente demonstra eficiência compatível com o processo empregado.

Gráfico - 7 Variação de fósforo total no afluente e efluente da ETE (agosto/2015 - dezembro/2016)



Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

De forma complementar à análise mensal apresentada nos Gráficos 1 a 7, foram incorporados a este estudo os resultados sistematizados por Souza *et al.* (2017), elaborados no âmbito das atividades desenvolvidas junto ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG (DESA-UFMG) para a ETE, no mesmo período de monitoramento considerado nesta pesquisa.

Esses dados, provenientes de planilhas consolidadas e de tratamentos estatísticos específicos, possibilitam a comparação entre médias, medianas, valores máximos e mínimos, desvios-padrão e eficiências globais de remoção dos parâmetros avaliados. As Tabelas 1 a 7 apresentam os resultados obtidos por Souza *et al.* (2017).

No caso da DBO, cujos valores consolidados encontram-se apresentados na Tabela 1, os valores mensais de afluente observados nesta pesquisa variaram entre 70 mg/L e 310 mg/L, sendo compatíveis com a faixa mais ampla descrita por Souza *et al.* (2017), que registraram

variação de 74 mg/L a 472 mg/L. Apesar de eventuais diferenças nos valores máximos, ambos os conjuntos confirmam a predominância de cargas orgânicas típicas de esgoto doméstico.

A média consolidada por Souza *et al.* (208 mg/L) é superior à média observada nos dados mensais desta pesquisa, que se situaram em torno de 186 mg/L, mas essa diferença decorre principalmente da presença de picos mais acentuados na série completa utilizada no estudo do DESA-UFMG. Ainda assim, os valores de efluente são extremamente próximos entre os dois levantamentos: 7-11 mg/L na série mensal e média de 2 mg/L nos dados de Souza *et al.* (2017), ambos demonstrando eficiências acima de 95%, com atendimento pleno ao limite COPAM de 60 mg/L.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas dos valores de DBO no afluente, efluente final e respectivas eficiências de remoção, obtidas a partir da série histórica monitorada na ETE

Parâmetros	Estatística	Afluente	Efluente Final	Eficiência (%)
DBO (mg/L)	Número de dados	49	49	49
	Média	208	2	98,6
	Mediana	208	2	98,8
	Mínimo	74	1	94,5
	Máximo	472	8	99,6
	Desvio padrão	88	1	1,1
	Coefficiente de variação	0,42	0,56	0,01

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

A mesma coerência é observada para a DQO, cujos resultados consolidados encontram-se apresentados na Tabela 2. Nos dados mensais analisados nesta pesquisa, as concentrações de afluente variaram entre 150 mg/L e 850 mg/L, enquanto Souza *et al.* (2017) registraram uma faixa mais ampla, de 123 mg/L a 1902 mg/L. Essa diferença indica que a série histórica utilizada pelo DESA-UFMG contempla episódios de cargas orgânicas mais elevadas, não necessariamente captados na série reduzida considerada neste estudo.

Apesar disso, as concentrações de efluente apresentam forte convergência entre os dois levantamentos, 15 a 40 mg/L nos dados mensais e média de 21 mg/L segundo Souza *et al.* (2017). Em ambos os conjuntos, a eficiência de remoção supera 90%, evidenciando a elevada capacidade oxidativa do sistema e a manutenção de desempenho consistente, mesmo diante de expressivas flutuações no afluente.

Tabela 2 - Parâmetros estatísticos da DQO no afluente e no efluente final, bem como da eficiência percentual de remoção, calculados com base nos dados operacionais da ETE

Parâmetros	Estatística	Afluente	Efluente Final	Eficiência (%)
DQO (mg/L)	Número de dados	49	49	49
	Média	558	21	95,4
	Mediana	528	21	95,7
	Mínimo	123	9	89,8
	Máximo	1902	54	99
	Desvio padrão	348	8	2,4
	Coefficiente de variação	0,62	0,4	0,03

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Em relação aos sólidos sedimentáveis (SS), cujos resultados consolidados estão apresentados na Tabela 3, observa-se o mesmo padrão de complementaridade entre as análises. Nos dados mensais, as concentrações no afluente variaram de 0 a 12 mL/L, enquanto no efluente situaram-se entre 0,1 e 0,2 mL/L. Souza *et al.* (2017) reportaram valores médios praticamente equivalentes (4 mL/L no afluente e 0,1 mL/L no efluente), com eficiências de remoção entre 88% e 99,2%, corroborando a estabilidade operacional e a elevada eficiência do sistema.

Tabela 3 - Estatísticas descritivas dos sólidos sedimentáveis (SS) no afluente, efluente final e da eficiência de remoção, considerando o conjunto de amostras analisadas

Parâmetros	Estatística	Afluente	Efluente Final	Eficiência (%)
SS (mL/L)	Número de dados	16	16	16
	Média	4	0,1	88
	Mediana	4	0,1	97,1
	Mínimo	0	0,1	0
	Máximo	12	0,1	99,2
	Desvio padrão	4	0	24,9
	Coefficiente de variação	0,89	0	0,28

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Para os sólidos suspensos totais (SST), apresentados na Tabela 4, também se verifica elevada aderência entre os conjuntos de dados. A série mensal analisada nesta pesquisa indica

variação de 80 mg/L a 720 mg/L no afluente e de 15 mg/L a 25 mg/L no efluente. Por sua vez, Souza *et al.* (2017) consolidaram médias de 329 mg/L para o afluente e 3 mg/L para o efluente, com eficiências de remoção próximas a 98%.

As diferenças pontuais observadas decorrem do fato de que os valores consolidados incorporam medições extremas registradas ao longo de todo o período operacional da ETE. Ainda assim, ambas as bases convergem ao evidenciar o elevado desempenho das etapas de decantação e retenção de sólidos, confirmando a eficiência global do sistema de tratamento.

Tabela 4 - Estatísticas descritivas dos sólidos suspensos totais (SST) no afluente, efluente tratado e eficiência percentual de remoção, conforme a base de monitoramento da ETE

Parâmetros	Estatística	Afluente	Efluente Final	Eficiência (%)
SST (mg/L)	Número de dados	49	49	49
	Média	329	3	98
	Mediana	221	3	98,5
	Mínimo	48	0	88,2
	Máximo	2515	21	99,9
	Desvio padrão	452	3	2,2
	Coeficiente de variação	1,38	0,95	0,02

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

No que se refere ao Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), cujos resultados consolidados estão apresentados na Tabela 5, os dados mensais desta pesquisa indicam concentrações variando entre 30 mg/L e 62 mg/L no afluente e entre 4 mg/L e 9 mg/L no efluente.

Souza *et al.* (2017) registraram uma faixa mais ampla, de 24 mg/L a 277 mg/L no afluente e de 1 mg/L a 28 mg/L no efluente, evidenciando maior variabilidade ao longo da série histórica completa. Ainda assim, a média consolidada apresentada pelos autores (54 mg/L no afluente e 5 mg/L no efluente) demonstra notável concordância com o comportamento médio observado nesta pesquisa.

A eficiência de remoção reportada (87,8%) é plenamente compatível com as reduções verificadas na análise mensal, confirmando o adequado desempenho da etapa de nitrificação e a efetiva incorporação de nitrogênio pela biomassa no sistema de tratamento.

Tabela 5- Estatísticas descritivas dos valores de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) no afluente, efluente final e eficiência de remoção, obtidas a partir do histórico operacional da ETE

Parâmetros	Estatística	Afluente	Efluente Final	Eficiência (%)
NTK (mg/L)	Número de dados	49	49	49
	Média	54	5	87,8
	Mediana	47	5	90,7
	Mínimo	24	1	36
	Máximo	277	28	98,9
	Desvio padrão	37	6	14
	Coefficiente de variação	0,69	1,05	0,16

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

O nitrogênio amoniacal, cujos resultados consolidados estão apresentados na Tabela 6, apresenta tendência semelhante à observada para os demais parâmetros. Nos dados mensais desta pesquisa, as concentrações variaram entre 20 e 55 mg/L no afluente e entre 3 e 8 mg/L no efluente. Souza *et al.* (2017) registraram uma faixa mais ampla, de 16,4 a 227,1 mg/L no afluente e de 0,9 a 25,6 mg/L no efluente, refletindo a maior abrangência temporal da série histórica analisada pelos autores.

Ainda assim, a mediana e a média consolidadas apresentadas por Souza *et al.* (2017), 35,4 mg/L e 40,1 mg/L no afluente, e 1,9 mg/L e 3,4 mg/L no efluente, situam-se dentro do intervalo típico verificado nos dados mensais desta pesquisa. Essa convergência reforça a consistência operacional do sistema e evidencia a estabilidade do processo de nitrificação ao longo do período avaliado.

Tabela 6 - Parâmetros estatísticos das concentrações de nitrogênio amoniacal no afluente e no efluente final, bem como da eficiência de remoção, segundo dados da ETE

Parâmetros	Estatística	Afluente	Efluente Final	Eficiência (%)
N - Amônia (mg/L)	Número de dados	49	49	49
	Média	40,1	3,4	89,8
	Mediana	35,4	1,9	95,3
	Mínimo	16,4	0,9	23,5
	Máximo	227,1	25,6	99

Desvio padrão	30,2	5,1	15,5
Coefficiente de variação	0,75	1,5	0,17

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Por fim, em relação ao fósforo total, cujos resultados consolidados estão apresentados na Tabela 7, os dados mensais desta pesquisa indicam concentrações no afluente variando entre 2 mg/L e 15 mg/L, e no efluente entre 1 mg/L e 3 mg/L.

Souza *et al.* (2017) consolidaram média de 8,5 mg/L no afluente e 1,5 mg/L no efluente, com eficiência média de remoção em torno de 79%. Embora haja diferenças na amplitude das faixas observadas, ambos os conjuntos de dados convergem ao demonstrar que o sistema apresenta desempenho satisfatório na remoção de fósforo.

Todavia, a eficiência obtida é inferior àquela verificada para compostos nitrogenados e para a matéria orgânica, resultado compatível com sistemas que não dispõem de etapa específica de precipitação química para remoção de fósforo.

Tabela 7 - Estatísticas descritivas do fósforo total no afluente, no efluente final e da eficiência de remoção, com base nos resultados de monitoramento da ETE

Parâmetros	Estatística	Afluente	Efluente Final	Eficiência (%)
Fósforo total (mg/L)	Número de dados	49	49	49
	Média	8,5	1,5	79,3
	Mediana	7,3	1,2	82,8
	Mínimo	1,8	0,1	14,4
	Máximo	44,1	7,5	99,3
	Desvio padrão	7,4	1,4	17,35
	Coefficiente de variação	0,87	0,92	0,22

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

De forma integrada, a análise comparativa entre os Gráficos 1 a 7 e as Tabelas 1 a 7 demonstra que os dados mensais avaliados nesta pesquisa se encontram plenamente inseridos nas tendências e faixas operacionais registradas nas estatísticas consolidadas por Souza *et al.* (2017). Ambos os conjuntos convergem ao indicar que a ETE apresenta desempenho elevado e estável, com resultados superiores aos limites regulamentares, alcançando eficiências acima

de 90% para DBO, DQO, SS, SST e compostos nitrogenados, além de remoções consistentes de fósforo.

Adicionalmente, conforme evidenciado na Tabela 8, as eficiências de remoção observadas nas etapas de tratamento primário, secundário e terciário revelam diferenças relevantes entre o desempenho previsto em projeto e aquele efetivamente verificado em operação. Os resultados apresentados por Souza *et al.* (2017) possibilitam uma avaliação comparativa detalhada das concentrações afluentes, efluentes e dos respectivos percentuais de remoção para os parâmetros DBO, SST, NTK e fósforo total, evidenciando o comportamento específico de cada unidade operacional ao longo do processo de tratamento.

Tabela 8 - Eficiências de remoção dos parâmetros DBO, SST, NTK e fósforo total nas unidades operacionais da ETE (tratamento primário, secundário e terciário), comparando os valores previstos em projeto com os observados em operação.

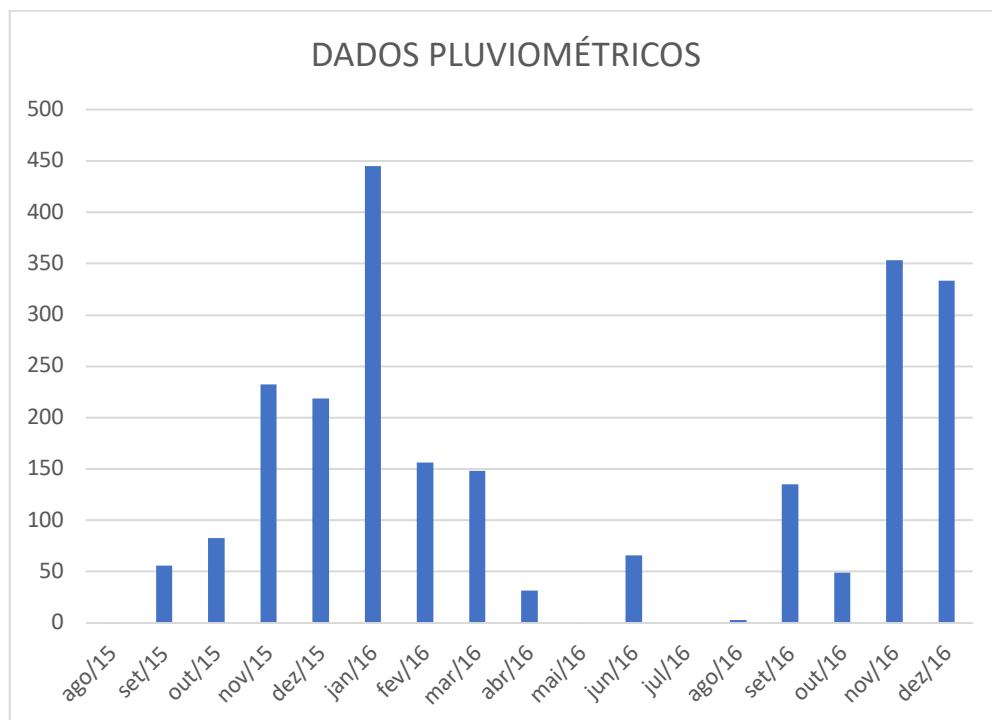
EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO DOS PARÂMETROS POR UNIDADES OPERACIONAIS							
		Projeto Tratamento Primário			Operação Tratamento Primário		
Parâmetros	Unidade	Afluente	Efluente	% Remoção	Afluente	Efluente	% Remoção
DBO	mg/L	519	311	40	182	64,4	64,6
SST	mg/L	577	231	60	253,5	65	96,1
NTK	mg/L	50	47,5	50	46,4	28,5	38,4
P total	mg/L	10	8	20	6,8	2,8	58,6
		Projeto Tratamento Secundário			Operação Tratamento Secundário		
Parâmetros	Unidade	Afluente	Efluente	% Remoção	Afluente	Efluente	% Remoção
DBO	mg/L	311	20	94	64,4	2,5	96,1
SST	mg/L	231	30	87	65	3,1	95,2
NTK	mg/L	47,5	2	96	28,5	5	82,6
P total	mg/L	8	7	13	2,8	1,2	58,9
		Projeto Tratamento Terciário			Operação Tratamento Terciário		
Parâmetros	Unidade	Afluente	Efluente	% Remoção	Afluente	Efluente	% Remoção
DBO	mg/L	20	5	75	2,5	2,4	4,33
SST	mg/L	30	5	83	3,1	3,8	82,6
NTK	mg/L	2	2	-	5	7,2	-
P total	mg/L	7	1	86	1,2	1	12,5

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

A análise comparativa entre os valores previstos em projeto e aqueles efetivamente observados na operação da ETE demonstra discrepâncias, especialmente no tocante às concentrações afluentes de DBO e DQO. Enquanto o projeto considerava cargas orgânicas compatíveis com esgoto típico, como, por exemplo, DBO afluente prevista de 519 mg/L no tratamento primário, os valores operacionais observados situaram-se em patamares inferiores, frequentemente abaixo de 200 mg/L. Essa diferença se explica, em grande parte, pela forte influência dos eventos pluviométricos no município de Ibirité durante os anos de 2015 e 2016, período em que a estação foi monitorada.

Conforme apresentado no Gráfico 8, a análise comparativa entre os valores previstos em projeto e aqueles efetivamente observados na operação da ETE evidencia discrepâncias relevantes, especialmente no que se refere às concentrações afluentes de DBO e DQO. Enquanto o projeto adotou como referência cargas orgânicas compatíveis com esgoto doméstico típico, como a DBO afluente estimada em 519 mg/L para a etapa de tratamento primário, os valores verificados em operação situaram-se em patamares significativamente inferiores, frequentemente abaixo de 200 mg/L.

Gráfico - 8 Gráfico pluviométricos



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Essa diferença pode ser atribuída, em grande medida, à influência de eventos pluviométricos no município de Ibirité nos anos de 2015 e 2016, período correspondente ao

monitoramento da estação, os quais contribuíram para a diluição das cargas afluentes e, conseqüentemente, para a redução das concentrações observadas.

A análise dos dados pluviométricos apresentados evidencia uma elevada variabilidade na precipitação ao longo do período avaliado, com destaque para os meses de novembro de 2015, dezembro de 2015, janeiro de 2016, novembro de 2016 e dezembro de 2016, nos quais foram registrados os maiores volumes de chuva acumulada. O mês de janeiro de 2016 apresentou o maior índice pluviométrico do período, com precipitação superior a 400 mm.

A ocorrência de elevados volumes de precipitação tem influência direta sobre as características do esgoto afluente à Estação de Tratamento de Esgoto, sobretudo em sistemas que apresentam contribuições indevidas de águas pluviais na rede coletora. Nessas condições, observa-se um efeito de diluição do esgoto bruto, que pode resultar na redução temporária das concentrações de parâmetros como a Demanda Química de Oxigênio (DQO), sem que isso represente, necessariamente, uma melhoria efetiva na eficiência do tratamento.

Ressalta-se que a rede de esgotamento sanitário é dimensionada exclusivamente para o transporte de efluentes domésticos, não sendo projetada para receber volumes adicionais de águas pluviais. A entrada indevida dessas contribuições pode provocar instabilidades hidráulicas no sistema, afetar o desempenho dos reatores anaeróbios e reduzir o potencial de geração de biogás, uma vez que a carga orgânica afluente passa a apresentar menores concentrações.

Dessa forma, a análise da pluviometria constitui um elemento fundamental para a correta interpretação dos resultados operacionais da ETE, permitindo diferenciar variações associadas às condições climáticas daquelas decorrentes do desempenho intrínseco do sistema de tratamento. Esses aspectos reforçam a importância de ações voltadas à fiscalização e à regularização das ligações na rede coletora, bem como à consideração dos efeitos da diluição nos estudos de aproveitamento energético do biogás.

O evento supracitado pode ocasionar a diluição do esgoto bruto, resultando na redução das concentrações de matéria orgânica afluente e, conseqüentemente, impactando negativamente os processos biológicos que dependem de carga orgânica suficiente para a manutenção da atividade microbiana. Essa diluição recorrente contribui para a acentuada variação observada nos valores de DQO afluente, que oscilaram mensalmente entre aproximadamente 150 mg/L e 850 mg/L, valores significativamente inferiores aos previstos em projeto e incompatíveis com o desempenho esperado de um sistema concebido para operar com processos de nitrificação, desnitrificação e elevada remoção de matéria orgânica.

Em períodos chuvosos, a estação tende a operar com cargas orgânicas reduzidas, condição que pode comprometer a estabilidade da biomassa aeróbia e, simultaneamente, reduzir a produção de biogás proveniente da digestão anaeróbia do lodo. Esse comportamento indica a ocorrência de subcarga operacional, associada à contribuição adicional de águas pluviais na rede coletora de esgoto. Em sistemas nos quais há interferência entre as redes pluvial e sanitária, o aumento da vazão durante eventos de precipitação provoca não apenas a diluição do afluente, mas também instabilidades operacionais, tais como redução do tempo de detenção hidráulica, arraste de sólidos e prejuízos às zonas de reação dos processos biológicos.

Observou-se que, em determinados períodos chuvosos, a concentração de matéria orgânica no afluente foi reduzida a níveis que podem caracterizar condições de subcarga biológica, nas quais a disponibilidade de substrato se torna insuficiente para sustentar, de forma ideal, a atividade microbiana. Nessas circunstâncias, verifica-se a diminuição da eficiência da digestão anaeróbia, o que contribui para a baixa, ou mesmo inexistente, produção de biogás em determinados intervalos, conforme indicado tanto pelo histórico operacional da estação quanto pelos dados apresentados por Souza *et al.* (2017).

O histórico de monitoramento evidencia que a Estação de Tratamento de Esgoto apresenta desempenho satisfatório quando submetida a cargas orgânicas compatíveis com aquelas consideradas em seu dimensionamento original. Entretanto, a performance observada ao longo do período analisado demonstra-se fortemente condicionada por fatores externos ao processo de tratamento, em especial pela variabilidade da carga afluente decorrente da influência da bacia de contribuição.

Dessa forma, os resultados obtidos reforçam que o subaproveitamento do potencial de tratamento e, sobretudo, do potencial de geração de biogás não decorre de limitações intrínsecas ao projeto ou à tecnologia empregada, mas está relacionado a aspectos estruturais e operacionais do sistema de coleta, incluindo a interferência de águas pluviais na rede sanitária. Tal constatação evidencia a importância de ações integradas de gestão da bacia de contribuição, fiscalização e adequação das redes, como elementos essenciais para garantir a operação plena da estação e o aproveitamento efetivo do potencial energético do biogás gerado.

6.2 Projeção de cálculos

A projeção dos cálculos de produção teórica de biogás na Estação de Tratamento de Esgoto foi realizada com base na metodologia apresentada por Chernicharo (2007) e nos fundamentos estequiométricos descritos por Metcalf e Eddy (2003), que relacionam a remoção de matéria orgânica, expressa em termos de Demanda Química de Oxigênio (DQO), à geração

de metano em sistemas de digestão anaeróbia. Essa abordagem é amplamente empregada em estudos de engenharia sanitária, especialmente em situações nas quais não há monitoramento contínuo da composição centesimal do biogás, permitindo estimar de forma indireta, porém tecnicamente consistente, o potencial energético associado ao lodo gerado no tratamento de esgotos domésticos.

Para fins de demonstração metodológica, os cálculos foram desenvolvidos com base nos dados referentes ao mês de outubro de 2016, período em que a concentração de DQO afluente (450 mg/L) apresentou maior proximidade com a média do intervalo analisado (464,71 mg/L). O período considerado, de agosto de 2015 a dezembro de 2016, foi definido em função da disponibilidade de dados públicos da unidade, sendo os resultados detalhados dos demais meses apresentados no Apêndice C.

6.2.1 Balanço de massa da DQO no sistema anaeróbio

A estimativa da produção de biogás foi iniciada a partir do balanço de massa da DQO no sistema anaeróbio. A carga de DQO afluente aplicada ao reator é parcialmente convertida em metano, enquanto outra fração é destinada à formação de biomassa. A carga de DQO convertida em metano foi determinada pela Equação (10):

$$DQO_{CH_4} = Q \cdot (S_0 - S) - Y_{obs} \cdot Q \cdot S_0 \quad (10)$$

em que:

- DQO_{CH_4} = carga diária de material orgânico convertida em metano e presente no biogás (kg DQO/d);
- Q = vazão de esgoto afluente (m³/d);
- S_0 = concentração de DQO afluente (kg DQO/m³);
- S = concentração de DQO efluente (kg DQO/m³);
- Y_{obs} = coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO (kg DQO_{lodo}/kg DQO_{apl}).

Antes de proceder à substituição dos valores na equação, é fundamental realizar a compatibilização das unidades de medida. Para o desenvolvimento dos cálculos, adotou-se a vazão média de esgoto afluente à estação igual a 140 L/s. Considerando que um dia possui 86.400 segundos e que 1 m³ equivale a 1.000 litros, a vazão diária foi determinada por meio da relação apresentada na Equação 11, resultando em uma vazão de 12.096 m³/d.

$$Q = \frac{140 \times 86.400}{1.000} = 12.096 \text{ m}^3/d \quad (11)$$

As concentrações de DQO afluyente (S_0), obtidas a partir de dados públicos da Estação de Tratamento de Esgoto analisada, encontram-se originalmente expressas em mg/L. Para fins de compatibilização das unidades com os demais parâmetros da equação, procedeu-se à conversão para kg DQO/m³, mediante a divisão dos valores por 1.000. Dessa forma, para o cenário referente a outubro de 2016, a concentração média de 450 mg DQO/L corresponde a 0,45 kg DQO/m³, conforme apresentado na Equação 12.

$$S_0 = \frac{450 \text{ mg/L}}{1.000} = 0,45 \text{ kg DQO/m}^3 \quad (12)$$

Para a estimativa da concentração de DQO no efluente do reator anaeróbio (S), foram considerados dois cenários distintos, com o propósito de conferir maior robustez à análise e possibilitar a comparação entre valores observados e estimativas teóricas. O primeiro cenário, denominado S fornecido, baseia-se nos dados públicos disponibilizados pela ETE analisada. O segundo, denominado S calculado, representa um cenário mais conservador, determinado a partir da eficiência média de remoção do sistema, conforme valores de referência consagrados na literatura técnica.

Para o mês de outubro de 2016, a concentração de DQO efluente informada nos dados públicos foi de 25 mg/L. A fim de assegurar a compatibilização das unidades com os demais parâmetros adotados nos cálculos, esse valor foi convertido para kg DQO/m³ mediante a divisão por 1.000, resultando em S fornecido igual a 0,025 kg DQO/m³, conforme apresentado na Equação 13.

$$S \text{ fornecido} = \frac{25 \text{ mg/L}}{1.000} = 0,025 \text{ kg DQO/m}^3 \quad (13)$$

A concentração de DQO no efluente do reator anaeróbio foi estimada com base na eficiência média de remoção do sistema. De acordo com Chernicharo (2007), podem ser adotados valores médios de remoção da ordem de 65% para DQO e 70% para DBO em reatores anaeróbios aplicados ao tratamento de esgotos domésticos. Assim, a concentração de DQO efluente foi determinada conforme a relação expressa na Equação 14.

$$S = S_0 - \frac{E \times S_0}{100} \quad (14)$$

em que:

- S = concentração de DQO ou de DBO efluente (mg/L);
- S_0 = concentração de DQO ou de DBO afluente (mg/L);
- E = eficiência de remoção de DQO ou de DBO (%).

Considerando-se uma concentração média de DQO afluente de 450 mg/L e adotando-se eficiência de remoção de 65%, o cenário calculado resultou em uma concentração de DQO efluente igual a 157,50 mg/L, equivalente a 0,16 kg/m³ após a conversão de unidades. Esses valores encontram-se demonstrados, respectivamente, nas Equações 15 e 16.

$$S \text{ calculado} = 450 \times (1 - 0,65) = 157,50 \text{ mg/L} \quad (15)$$

$$S \text{ calculado} = \frac{157,50 \text{ mg/L}}{1.000} = 0,16 \text{ kg DQO/m}^3 \quad (16)$$

Substituindo-se os valores obtidos na Equação 10, apresentada anteriormente, determinou-se a carga de DQO convertida em metano. Para o cenário fornecido, obteve-se 3.997,73 kg DQO_{CH₄}/d, enquanto, para o cenário calculado, o valor estimado foi de 2.395,01 kg DQO_{CH₄}/d, apresentados, respectivamente, nas Equações 17 e 18.

$$DQO_{CH_4} \text{ fornecido} = 12.096 \cdot (0,45 - 0,025) - 0,21 \cdot 12.096 \cdot 0,45 \quad (17)$$

$$DQO_{CH_4} \text{ fornecido} = 3997,728 \text{ kg DQO}_{CH_4}/d$$

$$DQO_{CH_4} \text{ calculado} = 12.096 \cdot (0,45 - 0,16) - 0,21 \cdot 12.096 \cdot 0,45 \quad (18)$$

$$DQO_{CH_4} \text{ calculado} = 2395,008 \text{ kg DQO}_{CH_4}/d$$

Com base na relação estequiométrica da digestão anaeróbia, a produção volumétrica teórica de metano pode ser estimada por meio da Equação 19, conforme proposto por Metcalf e Eddy (2003), que relaciona a carga de DQO convertida em metano à geração volumétrica de CH₄, com correção em função da temperatura operacional do reator:

$$V_{CH_4} = 0,35 \cdot DQO_{CH_4} \cdot \frac{273+T}{273} \quad (19)$$

em que:

- V_{CH_4} = produção volumétrica de metano (m³/d);
- DQO_{CH_4} = carga de DQO convertida em metano (kg DQO/d);
- T = temperatura operacional do reator (°C).

A adoção da constante 0,35 fundamenta-se no princípio estequiométrico segundo o qual a remoção de 1 g de DQO equivale, teoricamente, à produção de 0,35 L de metano em condições normais de temperatura e pressão (CNTTP) (Metcalf e Eddy, 2003). Entretanto, considerando que os reatores anaeróbios operam em temperaturas distintas das condições padrão, aplicou-se um fator de correção em função da temperatura operacional do sistema, conforme metodologia proposta por Chernicharo (2007).

De forma alternativa, a produção volumétrica de metano pode ser determinada pela Equação 20, que relaciona diretamente a carga de DQO convertida ao fator de conversão dependente da temperatura:

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{f(T)} \quad (20)$$

em que:

- Q_{CH_4} = produção volumétrica de metano (m³/d);
- DQO_{CH_4} = carga de DQO convertida em metano (kg DQO/d);
- $f(T)$ = fator de correção dependente da temperatura (kg DQO/m³).

O fator $f(T)$ é obtido por meio da Equação 21:

$$f(T) = \frac{p \cdot K}{R \cdot (273 + t)} \quad (21)$$

em que:

- p = pressão atmosférica (1 atm);
- K = equivalente de DQO por mol de CH₄ (64 g DQO/mol);
- R = constante universal dos gases (0,08206 atm·L/mol·K);
- t = temperatura operacional do reator (°C).

Considerando temperatura média de operação de 23 °C, o fator de conversão calculado por meio da Equação 22 foi de aproximadamente 2,63 kg DQO/m³ de CH₄:

$$f(T) = \frac{1 \times 64}{0,08206 \times (273 + 23)} = 2,63485 \text{ kg DQO/m}^3 \quad (22)$$

Substituindo-se a carga de DQO convertida em metano (3.997,728 kg DQO/d) na Equação 20, obteve-se, conforme a Equação 23, uma produção volumétrica diária de metano de 1.517,25 m³/d para o mês de outubro de 2016:

$$Q_{CH_4} = \frac{3997,728}{2,63485} = 1517,25 \text{ m}^3/\text{d} \quad (23)$$

Embora a produção teórica de metano represente um parâmetro fundamental para a avaliação do potencial energético de uma ETE, esse valor constitui apenas um limite superior estequiométrico. Na prática, a produção efetivamente capturada é inferior, em função de perdas físicas e biológicas inerentes aos reatores anaeróbios, especialmente aos reatores UASB (Chernicharo, 2007). A partir da produção volumétrica de metano, estimou-se a produção total de biogás por meio da Equação 24, considerando o teor de metano presente na mistura gasosa:

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{CH_4}}{C_{CH_4}} \quad (24)$$

em que:

- $Q_{biogás}$ = produção volumétrica de biogás (m^3/d);
- Q_{CH_4} = produção volumétrica de metano (m^3/d);
- C_{CH_4} = concentração de metano no biogás, usualmente da ordem de 70 a 80%.

Adotando-se valor médio de 75%, amplamente aceito na literatura (Chernicharo, 2007), obtiveram-se os seguintes resultados:

$$Q_{biogás\text{fornecido}} = \frac{1517,25}{0,75} = 2023,00 \text{ m}^3/\text{d} \quad (25)$$

$$Q_{biogás\text{calculado}} = \frac{908,97}{0,75} = 1211,96 \text{ m}^3/\text{d} \quad (26)$$

Por fim, o potencial energético associado ao biogás produzido foi determinado por meio da Equação 27, que considera o poder calorífico inferior (PCI) do biogás, a eficiência elétrica dos motogeradores e o período de operação:

$$E = Q_{biogás} \times PCI_{biogás} \times Eficiência_{motor} \times dias \quad (27)$$

em que:

- E = potencial de aproveitamento energético (kWh/d);
- $PCI_{biogás}$ = produção volumétrica de biogás (kWh/m^3);
- $Eficiência_{motor}$ = eficiência elétrica dos geradores;
- $dias$ = quantidade de dias de produção.

Adotando-se PCI de 6,0 kWh/m³ e eficiência elétrica de 33%, os resultados mensais para outubro de 2016 foram:

$$E_{fornecido} = (2023,00 \times 0,33 \times 6) \times 30 = 157.797,43 \text{ kWh/mês} \quad (28)$$

$$E_{calculado} = (1211,96 \times 0,33 \times 6) \times 30 = 71.990,53 \text{ kWh/mês} \quad (29)$$

O potencial mensal de aproveitamento energético, no cenário fornecido, totalizou 157.797,43 kWh/mês, ao passo que o cenário calculado apresentou valor estimado de 71.990,53 kWh/mês, conforme demonstrado nas Equações 28 e 29, respectivamente. O procedimento metodológico adotado possibilitou a estimativa consistente do potencial de recuperação energética do biogás produzido na estação, garantindo coerência entre o referencial teórico utilizado, as formulações matemáticas aplicadas e os resultados obtidos, em conformidade com as recomendações de Chernicharo (2007) e Metcalf e Eddy (2003).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo atingiu plenamente seu objetivo geral ao avaliar a eficiência operacional da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) analisada e ao estimar o potencial de recuperação de recursos, especialmente no que se refere à geração e ao aproveitamento energético do biogás, considerando as condições climáticas e operacionais observadas no período de 2015 a 2016. A integração entre a análise dos dados de monitoramento, a avaliação estatística e a aplicação de modelos teóricos de balanço de massa do gás e conversão energética permitiram uma compreensão abrangente do desempenho da unidade, bem como das limitações e oportunidades associadas ao seu funcionamento.

Os resultados obtidos demonstraram que a ETE apresenta elevada eficiência no tratamento do esgoto sanitário, evidenciada pela manutenção consistente dos parâmetros de qualidade do efluente final, como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), em níveis inferiores aos limites estabelecidos pelos critérios regulatórios e operacionais adotados em Minas Gerais. As eficiências médias de remoção desses parâmetros superaram 90% na maior parte do período analisado, confirmando a robustez dos processos biológicos e terciários implementados e a confiabilidade do sistema no atendimento às exigências ambientais de lançamento.

Entretanto, a análise estatística detalhada dos dados, em consonância com os resultados apresentados por Souza *et al.* (2017), evidenciou que a ETE operou, de forma predominante, sob condições de subcarga orgânica. Essa condição esteve diretamente associada à intrusão significativa de águas pluviais na rede coletora de esgotos, resultando em expressiva diluição do afluente. Como consequência, as concentrações de DBO e DQO afluentes apresentaram valores consideravelmente inferiores aos previstos em projeto, configurando um cenário operacional não ideal. Trata-se de um fator externo à unidade de tratamento, mas que influencia diretamente seu desempenho, afetando a estabilidade da biomassa microbiana e reduzindo o potencial de conversão da matéria orgânica em biogás.

O balanço de massa aplicado à fração de DQO direcionada à digestão anaeróbia do lodo permitiu estimar o potencial teórico máximo de produção de metano, estabelecendo um limite superior estequiométrico para a recuperação energética possível no sistema. Todavia, os resultados evidenciaram uma diferença significativa entre esse potencial teórico e o volume efetivamente recuperável de metano. Essa discrepância decorre da necessidade de considerar fatores de eficiência operacional que refletem as perdas inerentes ao processo, como a dissolução do metano no efluente líquido, possíveis vazamentos no sistema de coleta de biogás

e, sobretudo, as instabilidades do processo anaeróbio associadas à subcarga orgânica observada ao longo do período estudado.

Apesar dessa diferença entre o potencial máximo estimado e o volume efetivamente recuperável, os resultados obtidos indicam que a conversão do biogás em energia elétrica é tecnicamente viável e apresenta relevância operacional para a ETE analisada. O montante de energia estimado mostra-se compatível com a demanda interna da estação, considerando-se a capacidade de geração instalada de 720 kW. Dessa forma, o aproveitamento energético do biogás contribui para a redução dos custos operacionais associados ao consumo de energia elétrica, além de reforçar a autossuficiência energética da unidade.

Entretanto, a análise realizada também evidencia que a tomada de decisão para a implantação de sistemas de aproveitamento de biogás em estações de tratamento de esgoto ainda se encontra fortemente condicionada à viabilidade econômica imediata. Em unidades como a ETE Arrudas, caracterizadas por elevado consumo energético em função da utilização do sistema de lodos ativados, a geração de energia elétrica a partir do biogás para consumo próprio apresenta-se como uma alternativa tecnicamente adequada e economicamente atrativa. Em contrapartida, em estações como a ETE Onça, cujo nível de mecanização é reduzido e o consumo energético é relativamente baixo, a geração de eletricidade para autoconsumo tende a ser menos vantajosa do ponto de vista econômico.

Além disso, a comercialização do excedente de energia elétrica gerada a partir do biogás enfrenta limitações estruturais, uma vez que o valor de compra da energia pela rede concessionária é significativamente inferior ao custo da energia adquirida pela estação. Nesse contexto, o aproveitamento térmico do biogás surge como uma alternativa estratégica relevante. A utilização do biogás para a secagem e higienização do lodo permitiria uma redução expressiva do volume de resíduos destinados ao transporte e à disposição final, além de agregar valor ao material gerado no processo de tratamento.

O lodo seco e higienizado apresenta potencial de uso na recuperação de áreas degradadas pela atividade minerária, podendo atuar como condicionador de solo e fonte de matéria orgânica e nutrientes, substituindo parcialmente fertilizantes químicos de elevado custo. Essa aplicação, contudo, deve estar condicionada ao atendimento rigoroso dos critérios de qualidade sanitária e ambiental estabelecidos pela legislação vigente. Paralelamente, a elevada qualidade do efluente tratado, frequentemente superior aos limites mínimos exigidos para lançamento, reforça seu potencial para aplicações de reuso não potável, ampliando ainda mais a perspectiva de recuperação de recursos associada à ETE.

Para além dos aspectos económicos e operacionais, o aproveitamento do biogás assume papel estratégico na mitigação das emissões de gases de efeito estufa. A captura e utilização do metano evitam sua liberação direta para a atmosfera, reduzindo significativamente o impacto ambiental do sistema de tratamento, uma vez que o metano apresenta elevado potencial de aquecimento global.

Assim, a valorização do biogás contribui não apenas para a eficiência energética da ETE, mas também para o atendimento de compromissos ambientais e climáticos. O sistema de saneamento analisado configura-se como um exemplo concreto de transição para o paradigma da Economia Circular, no qual resíduos tradicionalmente tratados como passivos ambientais, como o lodo e o efluente tratado, passam a ser reintegrados à cadeia produtiva como insumos, na forma de energia, fertilizante e água de reuso.

A principal recomendação decorrente deste estudo é a necessidade de intensificar o controle da entrada de águas pluviais na rede de esgotamento sanitário. A mitigação desse problema estrutural permitiria que a ETE operasse mais próxima de sua carga nominal de projeto, otimizando os processos biológicos e ampliando, de forma significativa, o potencial de geração e aproveitamento do biogás. Dessa forma, confirma-se que a integração da digestão anaeróbia à gestão de resíduos da ETE constitui uma estratégia técnica, ambiental e economicamente sustentável para o saneamento básico, posicionando a estação como uma unidade ativa de recuperação de energia e nutrientes.

REFERÊNCIAS

- ABD, Ammar Ali *et al.* An overview of biogas upgrading via pressure swing adsorption: Navigating through bibliometric insights towards a conceptual framework and future research pathways. **Energy Conversion and Management**, v. 306, p. 118268, 2024.
- ABD, A A *et al.* Methane enrichment in biogas mixture using pressure swing adsorption: process fundamental and design parameters. **Materials Today Sustainability**, v. 11, p. 100063, 2021.
- ALCÂNTARA, Lucas da Paixão. A viabilidade econômica de modelos de biodigestores para a produção de biogás. **Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia**, v. 13, n. 32, p. 1–50, 2022.
- ANDRADE, Clarissa Dias Rodrigues; LOPES, Guilherme Augusto Hilário. Brasil República: uma história de surtos, pandemias e epidemias. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, v. 5, n. 14, p. 70–92, 2021.
- ANP, Agência Nacional do Petróleo Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil. **Biometano**. Brasília: Governo Federal, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biometano>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Cadernos Técnicos ESA**. Rio de Janeiro: ABES; Revista Engenharia Sanitária e Ambiental; Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Estações Sustentáveis de Esgotamento Sanitário (INCT ETEs Sustentáveis), 2021. 1 v. (Cadernos Técnicos Eng. Sanit. Ambient, v. 1, n. 1).
- BARBOSA, Patrícia Carvalho. Avaliação técnico-econômica da produção de biogás a partir do dimensionamento do biodigestor e tratamento da água residuária da suinocultura. **Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri**, 2023.
- BOARATI, Sandra Rodrigues Sarro; DE CASTRO, Marcus Cesar Avezum Alves. Composition of Biogas in a Medium-Sized Landfill: Temporal Analysis. 2024.
- BORGES, Matheus Martins Parreira *et al.* Aproveitamento energético de biogás de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. **Caderno Pedagógico**, v. 22, n. 7, p. e16081–e16081, 2025.
- BRASIL, Câmara dos Deputados. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. 2007. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2007/lei-11445-5-janeiro-2007-549031-publicacaooriginal-64311-pl.html>. Acesso em: 26 mar. 2023.
- BRASIL, Casa Civil. **Governo Federal lança medidas de incentivo à produção e ao uso sustentável do biometano**. Brasília: Governo Federal, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/assuntos/noticias/2022/marco/governo-federal-lanca-medidas-de-incentivo-a-producao-e-ao-uso-sustentavel-do-biometano>.

BRASIL, Presidência da República. **LEI Nº 11.097, DE 13 DE JANEIRO DE 2005**. Brasília: Casa Civil, 2005. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/111097.htm.

BRASIL, Presidência da República. **LEI Nº 13.576, DE 26 DE DEZEMBRO DE 2017**. Brasília: Secretaria Geral, 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/113576.htm.

BRASIL, Presidência da República. **LEI Nº 14.026, DE 15 DE JULHO DE 2020**. Brasília, D.F.: Secretaria Geral, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/114026.htm.

BRASIL, Presidência da República. **LEI Nº 9.478, DE 6 DE AGOSTO DE 1997**. Brasília: Casa Civil, 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19478.htm.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **RESOLUÇÃO Nº 375 , DE 29 DE AGOSTO DE 2006**. Brasília: Conama, 2006. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=22347.

CAÑOTE, Susan J. B. *et al.* Energy and Economic Evaluation of the Production of Biogas from Anaerobic and Aerobic Sludge in Brazil. **Waste and Biomass Valorization**, v. 12, n. 2, p. 947–969, 2021. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s12649-020-01046-w>.

CASTRO, Aline Antonia *et al.* Dessulfurização de biogás por processo fotossintético com microalgas e absorção por lavagem com água. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 10, p. e388111032891–e388111032891, 2022.

CHEN, Yi-Fang *et al.* Biogas upgrading by pressure swing adsorption with design of experiments. **Processes**, v. 9, n. 8, p. 1325, 2021.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, v. 5, 1997. 245 p.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. 2. ed. ver. e ampl. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, v. 5, 2007. 377 p.

CHIAVELLI, Henrique Gabriel Rovigatti *et al.* Etapas de um sistema de tratamento de efluente e processos convencionais de tratamento: uma revisão de literatura. *In: , 2019. IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. [S. l.: s. n.]*, 2019.

COELHO, Ulisses Raad *et al.* Biogás: aproveitamento energético e gestão ambiental em aterro sanitário. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 3, p. 540–553, 2021.

COPAM. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 8, de 21 de Novembro de 2022**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Minas Gerais. Conselho Estadual de Política Ambiental. 2022.

COSTA, Nilson do Rosário. Política Pública de Saneamento Básico no Brasil: ideias, instituições e desafios no Século XXI. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 28, n. 9, p. 2595–2600, 2023. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232023000902595&tlng=pt.

COSTA, Gedeão Rodrigues *et al.* Saneamento básico: sua relação com o meio ambiente e a saúde pública. **PARAMÉTRICA**, v. 14, n. 1, 2022.

DA SILVA, Fabio Leandro *et al.* Gestão de recursos hídricos e manejo de bacias hidrográficas no Brasil: elementos básicos, histórico e estratégias. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1626–1653, 2021.

DANTAS, Maria Jorgiana Ferreira; CHAVES, José Wémenson Rabelo; PIRES, Roberta Oliveira Roque. Estimativa do potencial energético proveniente do biogás gerado em aterro sanitário no Ceará. **Revista Tecnologia**, v. 42, n. 1, 2021.

FERREIRA, Paula do Nascimento. **Estimativa do potencial de produção de biogás a partir de biodigestor anaeróbio em uma granja suinícola no município de Sete Lagoas – MG: estudo de caso**. Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, 2016.

FRANQUETO, Rafaela *et al.* Monitoramento de emissões fugitivas a partir da camada de cobertura de aterro sanitário. **Uningá Review**, v. 35, p. eRUR2603–eRUR2603, 2020.

FREDDO, Alessandra *et al.* PANORAMA DO BIOGÁS NO BRASIL 2022. **CIBiogás**, Foz do Iguaçu, v. 1, n. 1, p. 31, 2022. Disponível em: https://cibiogas.org/wp-content/uploads/2023/12/Panorama_do_Biogs_no_Brasil_2022.pdf.

FREITAS, Adriano de. Potencialidades do reuso de esgoto doméstico tratado em estação de tratamento de esgoto (ETE). 2024.

GOMES, Leonardo Henrique Santos. **Possibilidades para a utilização de biogás: um estudo teórico**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

INCT, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia. **O que se pode aproveitar do Esgoto?**. São Paulo: ETes Sustentabilidade, 2019. Disponível em: <https://etes-sustentaveis.org/aproveitar-esgoto/>.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento 2024**. Brasília: [s. n.], 2025. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2024/04/Relatorio-Completo-Ranking-do-Saneamento-de-2024-TRATA-BRASIL-GO-ASSOCIADOS.pdf>.

JULIANI, Carla Fernanda Sander. **Norma para Toda Obra–Volume Único: Compilado de Normas, Leis e Manuais-Engenharia Civil**. Editora Moan, 2024.

JUNIOR, Luciano Albuquerque Rosa *et al.* Aproveitamento de Biogás e Lodo em Pequenas Etes: Estudo de Caso em Catas Altas. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 64831–64843, 2021. Disponível em:

<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/32156>.

JUNIOR, Jonas Abilio Sestrem. **Metodologia de análise de risco de investimento em sistemas de geração distribuída a partir de biogás produzido em estações de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

JUNIOR, Francisco Auriberto Ferreira Marques; MONTEIRO, Veruschka Escarião Dessoles; DE MELO, Márcio Camargo. **Condições intervenientes na geração de biogás de resíduos recém dispostos em aterro sanitário e com um ano de aterramento**. Amplla Editora, 2024.

LANNES, Lucas Rachid de Oliveira; FONTOURA, Geraldo Andre Thurler; LERMONTOV, André; PEREIRA, Rodrigo Alves dos Santos. II-001 - Análise comparativa da geração teórica e real de biogás de uma estação de tratamento de esgotos com sistema anaeróbio do tipo UASB. **Cadernos Técnicos Eng. Sanit. Ambient**, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2021.

LIMA, Ana Carolina Guedes; PASSAMANI, Fernanda Caliman. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS PRODUZIDO NO REATOR UASB DA ETE-UFES**. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Ambiental, 2012.

LINS, Leonardo Pereira *et al.* O aproveitamento energético do biogás como ferramenta para os objetivos do desenvolvimento sustentável. **Interações (Campo Grande)**, p. 1275–1286, 2022. Disponível em: <https://interacoes.ucdb.br/interacoes/article/view/3704>.

MARQUES, Keite. Aproveitamento de resíduos de estação de tratamento de esgoto resulta em trabalho inovador na EESC-USP. 2015.

MARTINEZ, Daiana Gotardo. Dessulfurização biológica–estudo de caso com microaeração em biodigestor de lagoa coberta. 2019.

MELO, Camila Bonatto de. Viabilidade Técnica e Econômica de uma Unidade Geradora de Energia Elétrica a partir do Biogás proveniente de Dejetos Suínos de Pequenos Produtores Rurais da Região do Oeste do Paraná: Produção Centralizada x Produção Descentralizada de Biogás. 2023.

MERGENTHAL, Marcus *et al.* Methane enrichment for biogas purification using pressure swing adsorption techniques. **Materials Today: Proceedings**, v. 72, p. 2915–2920, 2023.

MESQUITA, Tayane Cristiele Rodrigues *et al.* Gestão descentralizada de soluções de esgotamento sanitário no Brasil: aspectos conceituais, normativos e alternativas tecnológicas. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 56, p. 46–66, 2021.

MEYER, Rafaela Faust; ELIOTT, Rodrigo Monteiro. Estudo da viabilidade técnica dos parâmetros operacionais de um biodigestor tipo lagoa coberta em escala laboratorial, utilizando carcaças suínas como substrato. 2025.

MILANEZ, Artur Yabe; MAIA, Guilherme Baptista da Silva; GUIMARÃES, Diego Duque. Biogás: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil. **BNDES**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 53, p. 177–216, 2021. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/20801/1/PR_Biogas_215276_P_BD.pdf.

MODERNO, Leonardo Gomes Sampaio; SANTOS, Bruno Henrique Souza; VELÁZQUEZ, Sílvia Maria Stortini González. Geração de energia a partir de biogás proveniente de dejetos animais: estudo de caso em uma pequena propriedade rural. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, v. 22, n. 1, 2022. Disponível em: <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rmec/article/view/14722>.

MONTENEGRO, Lucas Felex. **Análise de viabilidade de aplicação e eficiência de sistemas MBBR e IFAS para tratamento de efluentes no Brasil**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2022.

MOREIRA, Francisco Gleson dos Santos *et al.* Emissões fugitivas de biogás em camada de cobertura de solo compactado em aterro sanitário. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 25, p. 247–258, 2020.

MOTTA, Matheus Almeida *et al.* Evaluation of the Energy Generation Potential from Urban Waste: A Case Study for the Municipality of Lima Duarte, Minas Gerais, Brazil. *In:* , 2023. **2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)**. IEEE, 2023. p. 242–247. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10374761/>.

NONNENMACHER, Ewerton *et al.* Trilha do Metano: uma proposta de jogo didático sobre saneamento básico e aproveitamento energético do esgoto sanitário para o ensino de Química. **Quím. nova esc**, v. 45, n. 1, p. 5–13, 2023.

OLIVEIRA, Mariana Gabriela de *et al.* Geração Distribuída do Biogás e Políticas Públicas. *In:* **8º Congresso Brasileiro de Geração Distribuída (CBGD 2023)**. Brasil, 2023.

ONUDI, Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial. **E-book: Segurança em plantas de biogás: guia de boas práticas**. 1. ed. Brasília: MCTI, 2021. v. 1 Disponível em: [https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/protectedfiles/Seguranca_em_plantas_de_biogas_\(2020\).pdf](https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/protectedfiles/Seguranca_em_plantas_de_biogas_(2020).pdf).

PAGE, Matthew J *et al.* Updating guidance for reporting systematic reviews: development of the PRISMA 2020 statement. **Journal of clinical epidemiology**, v. 134, p. 103–112, 2021.

PEIXOTO, André Luís Almeida; AHMED, Flávio Villela; SALES, Camila Mendonça Romero. Saneamento Básico: direito de todos? Uma breve análise. **Petróleo Royalties e Região**, v. 19, n. 70, 2021.

PERES, Camilla Silva *et al.* Evaluation of treated wastewater quality for reuse in the northern region of minas gerais. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 1–20, 2024.

ROCHA, Gláucia Veloso. Viabilidade financeira de projetos de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em aterros sanitários no estado de São Paulo. 2023.

RODRIGUES, Camilla Maria Silva; DA COSTA, Luis Ricardo Fernandes. Considerações para a compreensão do saneamento básico no Brasil. **Revista Verde Grande: Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 5, n. 01, p. 186–204, 2023.

RODRIGUES, Antonio Felipe Oliveira; RAUPP, Fabiano Maury. Saneamento no Brasil:

Marco regulatório, política pública e níveis de atendimento. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, v. 13, n. 38, p. 342–363, 2023.

ROSSONI, Cristiane Moreira. **Legislação brasileira atinente à cadeia produtiva do Biogás**. São Paulo: Direito Ambiental, 2023. Disponível em: <https://direitoambiental.com/legislacao-brasileira-atinente-a-cadeia-produtiva-do-biogas/>.

SABESP, Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Avaliação Shades of Green**. São Paulo: Shades of Green, 2024. Disponível em: <https://www.sabesp.com.br/site/toq/x/y/sp-relatorio-de-avaliacao-acoes-verdes-b3.pdf>.

SANEAS. **Desafios para o reúso dos subprodutos do saneamento: biogás, água e iodo**. São Paulo: ONLINE SANEAS ÁGUA E SANEMANETO, 2023. Disponível em: <https://www.saneasonline.com.br/noticias/desafios-para-o-reuso-dos-subprodutos-do-saneamento-biogas-agua-e-iodo>.

SANTIAGO, Hector da Silva; SANTIAGO, Eduardo Lage Gouveia. Potencial energético utilizando a produção de biogás em tratamento de esgoto. **Engineering Sciences**, v. 7, n. 1, p. 73–80, 2019.

SESTREM JUNIOR, Jonas Abilio *et al.* **Metodologia de análise de risco de investimento em sistemas de geração distribuída a partir de biogás produzido em estações de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico**. 2019. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

SILVA, Maise Natalia Soares da *et al.* Análise de aproveitamento energético de biogás em Vitória da Conquista (BA). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 8, p. 459–468, 2022.

SILVA, Antônio Jakcson da Miranda *et al.* Estudo de viabilidade de usina de biogás para geração de energia elétrica em Sítio Novo do Tocantins. **Revista Sítio Novo**, v. 5, n. 3, p. 6–15, 2021.

SILVA, Guilherme Almeida da. Hidrogênio a partir do biogás: possibilidade do armazenamento de energia sustentável. 2023.

SILVA, Ana Paula Moni *et al.* Study on preliminary economic availability of electric energy use from drying bed sludge by biogas from anaerobic digestion and incineration in Brazil. **Cleaner Waste Systems**, v. 6, p. 100117, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S277291252300043X>.

SILVA, Claudionor de Oliveira. Sustentabilidade da biomassa dos resíduos sólidos de aterro sanitário para geração de biogás. 2020.

SILVA, Leandro de Oliveira. Uso de Biodigestores em Estação de Tratamento de Esgoto. **UNICIÊNCIAS**, v. 28, n. 1, p. 25–31, 2024.

SILVA, Thobias Pereira; JÚNIOR, José Lima Oliveira; DE MATOS CORDEIRO, Rosemary. Análise de viabilidade técnico-econômica da utilização do biogás/metano de reatores UASB, para geração de energia elétrica. **Revista Científica Foz**, v. 4, n. 1, 2021.

SILVA, Claudionor de Oliveira; KONRAD, Odorico; CALLADO, Nélia Henriques. Geração de Biogás no Aterro Sanitário de Maceió a Partir de Modelos Empíricos. **Fronteira: Journal of Social, Technological and Environmental Science**, v. 11, n. 2, p. 68–82, 2022.

SILVA, Marcela de Souza; LEITE, Sibebe Augusta Ferreira; LEITE, Brenno Santos. Overview of the Use of Anaerobic Digestion on Swine Farms and the Potential for Bioenergy Production in Minas Gerais, Brazil. *In:* , 2025, Basel Switzerland. **SUSTENS 2025**. Basel Switzerland: MDPI, 2025. p. 5. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-3900/121/1/5>.

SOUZA FILHO, José Demontier Vieira de. Desenvolvimento de protótipo para enriquecimento de biogás de aterro sanitário. 2023.

SOUZA, Tatiane Leticia de Carvalho; ROCHA, André Luiz Marques; BRIANEZI, Daniel. Energy potential and economic feasibility of biogas: case study of a landfill in Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 56, n. 4, p. 643–653, 2021. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/935.

SOUZA, Saulo Nonato de; CARDOSO, Frieda Keifer; JARDIM, Priscilla Otávia Tito; AZEVEDO, Sirlei Geraldo de. **Avaliação preliminar dos resultados operacionais de uma estação de tratamento de esgotos em escala real, com tratamento terciário – ETE Ibitiré**. São Paulo: ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental; AESABESP – Associação dos Engenheiros da Sabesp, 2017.

TERA AMBIENTAL. **Estação de tratamento de esgoto: conheça os processos aeróbicos e anaeróbicos**. São Paulo: Tera, 2025. Disponível em: <https://www.teraambiental.com.br/blog-da-tera-ambiental/estacao-de-tratamento-de-esgoto-etapas-dos-tratamentos>.

UN, UNITED NATIONS. **Down the drain lies a promising climate and nature solution – UN report**. Geneva: UNEP, 2023. Disponível em: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/down-drain-lies-promising-climate-and-nature-solution-un-report>.

VIEIRA, Henrique Gois; POLLI, Henrique Quero. O biogás como fonte alternativa de energia. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 388–400, 2020.

VILARINHO, Cíntia Maria Ribeiro; DO COUTO, Eduardo de Aguiar. Saneamento básico e regulação no Brasil: desvendando o passado para moldar o futuro. **Revista Digital de Direito Administrativo**, v. 10, n. 2, p. 233–257, 2023.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. Editora UFMG, 1996.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas gerais, 1997.

APÊNDICE A

Tabela 9 - Valores de DBO no afluente e efluente da ETE no período de agosto/2015 a dezembro/2016

DBO			
Mês/Ano	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	COPAM (mg/L)
ago/15	130	10	60
set/15	230	10	60
out/15	70	8	60
nov/15	140	9	60
dez/15	120	8	60
jan/16	90	7	60
fev/16	190	9	60
mar/16	210	9	60
abr/16	250	10	60
mai/16	310	11	60
jun/16	280	10	60
jul/16	250	10	60
ago/16	220	9	60
set/16	210	9	60
out/16	190	8	60
nov/16	170	9	60
dez/16	110	9	60

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Tabela 10 - Valores de DQO no afluente e efluente da ETE no período de agosto/2015 a dezembro/2016

DQO			
Mês/Ano	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	COPAM (mg/L)
ago/15	600	40	180
set/15	500	35	180
out/15	300	25	180
nov/15	350	30	180
dez/15	320	25	180
jan/16	180	20	180

fev/16	150	15	180
mar/16	700	25	180
abr/16	500	30	180
mai/16	750	35	180
jun/16	850	30	180
jul/16	600	30	180
ago/16	550	28	180
set/16	500	30	180
out/16	450	25	180
nov/16	400	28	180
dez/16	300	25	180

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Tabela 11 - Sólidos sedimentáveis no afluente e efluente da ETE no período de agosto/2015 a dezembro/2016

SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS			
Mês/Ano	Afluente (mL/L)	Efluente (mL/L)	COPAM (mL/L)
ago/15	3	0,2	1
set/15	5	0,2	1
out/15	10	0,1	1
nov/15	0	0,1	1
dez/15	3	0,1	1
jan/16	1	0,1	1
fev/16	0	0,1	1
mar/16	12	0,2	1
abr/16	2	0,2	1
mai/16	3	0,1	1
jun/16	4	0,1	1
jul/16	3	0,1	1
ago/16	10	0,2	1
set/16	1	0,1	1
out/16	0	0,1	1
nov/16	0	0,1	1

dez/16	4	0,2	1
---------------	---	-----	---

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Tabela 12 - Sólidos suspensos totais no afluente e efluente da ETE no período de agosto/2015 a dezembro/2016

SÓLIDOS SUSPENSOS TOTAIS			
Mês/Ano	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)	COPAM (mg/L)
ago/15	270	20	100
set/15	280	22	100
out/15	90	18	100
nov/15	180	19	100
dez/15	130	17	100
jan/16	80	15	100
fev/16	100	18	100
mar/16	720	20	100
abr/16	250	22	100
mai/16	300	25	100
jun/16	450	20	100
jul/16	320	18	100
ago/16	250	19	100
set/16	200	18	100
out/16	150	17	100
nov/16	130	18	100
dez/16	100	17	100

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Tabela 13 - Concentração de nitrogênio total Kjeldahl (NTK) no afluente e efluente da ETE

NKT		
Mês/Ano	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)
ago/15	45	5
set/15	55	5
out/15	62	8

nov/15	48	4
dez/15	50	5
jan/16	55	7
fev/16	58	8
mar/16	53	6
abr/16	30	9

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Tabela 14 - Concentração de nitrogênio amoniacal no afluente e efluente da ETE no período de agosto/2015 a dezembro/2016

N-AMONICAL		
Mês/Ano	Afluente (mg N– NH₄/L)	Efluente (mg N– NH₄/L)
ago/15	45	25
set/15	20	5
out/15	35	5
nov/15	30	4
dez/15	25	4
jan/16	20	3
fev/16	55	4
mar/16	28	5
abr/16	35	6
mai/16	40	6
jun/16	45	5
jul/16	42	5
ago/16	38	4
set/16	42	8
out/16	40	6
nov/16	35	4
dez/16	25	7

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Tabela 15 - Concentração de fósforo total no afluente e efluente da ETE no período de agosto/2015 a dezembro/2016

FÓSFORO		
Mês/Ano	Afluente (mg P/L)	Efluente (mg P/L)
ago/15	4	1
set/15	9	1
out/15	3	1
nov/15	6	1
dez/15	4	1
jan/16	2	1
fev/16	15	1
mar/16	5	1.5
abr/16	8	2
mai/16	14	2.5
jun/16	12	3
jul/16	10	3
ago/16	9	3
set/16	8	2.5
out/16	8	2.3
nov/16	7	2
dez/16	4	1.5

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

APÊNDICE B

Tabela 16 - Dados pluviométricos

DADOS PLUVIOMÉTRICOS		
INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA		
Data de Referência: 01/08/2015 - 31/12/2016		
Mês	Chuva (mm)	DQO Afluente (mg/L)
ago/15	0,6	600
set/15	55,8	500
out/15	83	300
nov/15	232,4	350
dez/15	218,6	320
jan/16	445,2	180
fev/16	156,2	150
mar/16	148	700
abr/16	31,6	500
mai/16	0,2	750
jun/16	66	850
jul/16	0	600
ago/16	3	550
set/16	135,4	500
out/16	49,2	450
nov/16	353,2	400
dez/16	333,2	300

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

APÊNDICE C

Tabela 17 - Concentração de DQO Afluente (S₀) no período de agosto/2015 a dezembro/2016

CONCENTRAÇÃO DE DQO AFLUENTE (S₀)		
Mês/Ano	S₀ (mg/L)	S₀ (kgDQO/m³)
ago/15	600	0,6
set/15	500	0,5
out/15	300	0,3
nov/15	350	0,35
dez/15	320	0,32
jan/16	180	0,18
fev/16	150	0,15
mar/16	700	0,7
abr/16	500	0,5
mai/16	750	0,75
jun/16	850	0,85
jul/16	600	0,6
ago/16	550	0,55
set/16	500	0,5
out/16	450	0,45
nov/16	400	0,4
dez/16	300	0,3

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Tabela 18 - Concentração de DQO Efluente Fornecida (S) no período de agosto/2015 a dezembro/2016

CONCENTRAÇÃO DE DQO EFLUENTE FORNECIDA		
Mês/Ano	S fornecido (mg/L)	S fornecido (kgDQO/m³)
ago/15	40	0,04
set/15	35	0,035
out/15	25	0,025
nov/15	30	0,03
dez/15	25	0,025
jan/16	20	0,02

fev/16	15	0,015
mar/16	25	0,025
abr/16	30	0,03
mai/16	35	0,035
jun/16	30	0,03
jul/16	30	0,03
ago/16	28	0,028
set/16	30	0,03
out/16	25	0,025
nov/16	28	0,028
dez/16	25	0,025

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Tabela 19 - Concentração de DQO Efluente Calculada (S) com Base na Eficiência Média de Remoção (65%)

CONCENTRAÇÃO DE DQO EFLUENTE CALCULADA		
Mês/Ano	S calculado (mg/L)	S calculado (kgDQO/m³)
ago/15	210,00	0,21
set/15	175,00	0,18
out/15	105,00	0,11
nov/15	122,50	0,12
dez/15	112,00	0,11
jan/16	63,00	0,06
fev/16	52,50	0,05
mar/16	245,00	0,25
abr/16	175,00	0,18
mai/16	262,50	0,26
jun/16	297,50	0,30
jul/16	210,00	0,21
ago/16	192,50	0,19
set/16	175,00	0,18
out/16	157,50	0,16

nov/16	140,00	0,14
dez/16	105,00	0,11

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Tabela 20 - Carga de DQO Convertida em Metano (DQO_{CH_4}) nos Cenários Fornecido e Calculado

MASSA DE METANO (kg DQO_{CH_4}/d)		
Mês/Ano	DQO_{CH_4} fornecido	DQO_{CH_4} calculado
ago/15	5249,664	3193,344
set/15	4354,56	2661,12
out/15	2564,352	1596,672
nov/15	2981,664	1862,784
dez/15	2755,4688	1703,1168
jan/16	1478,1312	958,0032
fev/16	1251,936	798,336
mar/16	6386,688	3725,568
abr/16	4415,04	2661,12
mai/16	6743,52	3991,68
jun/16	7759,584	4523,904
jul/16	5370,624	3193,344
ago/16	4917,024	2927,232
set/16	4415,04	2661,12
out/16	3997,728	2395,008
nov/16	3483,648	2128,896
dez/16	2564,352	1596,672

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Tabela 21 - Produção Volumétrica Teórica de Metano ($m^3 CH_4/d$) nos Cenários Fornecido e Calculado

PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA TEÓRICA DE METANO		
Mês/Ano	Q CH_4 fornecido	Q CH_4 calculado
ago/15	1992,39	1211,96
set/15	1652,68	1009,97

out/15	973,24	605,98
nov/15	1131,62	706,98
dez/15	1045,78	646,38
jan/16	560,99	363,59
fev/16	475,14	302,99
mar/16	2423,92	1413,96
abr/16	1675,63	1009,97
mai/16	2559,35	1716,95
jun/16	2944,98	1716,95
jul/16	2038,30	1211,96
ago/16	1866,15	1110,97
set/16	1675,63	1009,97
out/16	1517,25	908,97
nov/16	1322,14	807,97
dez/16	973,24	605,98

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Tabela 22 - Produção Volumétrica Estimada de Biogás (m³/d) nos Cenários Fornecido e Calculado

PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA ESTIMADA DE BIOGÁS		
Mês/Ano	Q biogás fornecido	Q biogás calculado
ago/15	2656,52	1615,95
set/15	2203,57	1346,62
out/15	1297,66	807,97
nov/15	1508,83	861,84
dez/15	1394,37	861,84
jan/16	747,99	484,78
fev/16	633,53	403,99
mar/16	3231,90	1885,27
abr/16	2234,17	1346,62
mai/16	3412,47	2289,26
jun/16	3926,63	2289,26
jul/16	2717,73	1615,95

ago/16	2488,19	1481,29
set/16	2234,17	1346,62
out/16	2023,00	1211,96
nov/16	1762,85	1077,30
dez/16	1297,66	807,97

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).

Tabela 23 - Potencial Mensal de Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás (kWh/mês)

POTENCIAL MENSAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA		
Mês/Ano	E biogás fornecido	E biogás calculado
ago/15	157797,43	95987,38
set/15	130891,88	79989,48
out/15	77080,77	47993,69
nov/15	89624,58	51193,27
dez/15	82825,47	51193,27
jan/16	44430,52	28796,21
fev/16	37631,42	23996,84
mar/16	191974,76	111985,28
abr/16	132709,82	79989,48
mai/16	202700,62	135982,12
jun/16	233242,06	135982,12
jul/16	161433,32	95987,38
ago/16	147798,75	87988,43
set/16	132709,82	79989,48
out/16	120166,02	71990,53
nov/16	104713,51	63991,59
dez/16	77080,77	47993,69

Fonte: Elaborado pela autora (2025), adaptado de Souza *et al.* (2017).