

Fábio Luís Alvarenga Guimarães

Viabilidade Econômica da Geração de Energia Elétrica Com Biogás: Aproveitamento do Biogás Oriundo do Lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Barra Mansa - RJ

Vassouras
2025

Fábio Luís Alvarenga Guimarães

Viabilidade Econômica da Geração de Energia Elétrica Com Biogás: Aproveitamento do Biogás Oriundo do Lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Barra Mansa - RJ

Dissertação apresentada a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação e Capacitação Profissional/ Coordenação do Mestrado Profissional em Ciências Ambientais da Universidade de Vassouras, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador(es):

Prof. Dr. Sandro Pereira Ribeiro, Universidade de Vassouras
Doutor pela (Universidade Federal de Juiz de Fora – Juiz de Fora, Brasil)

Vassouras
2025

Fábio Luís Alvarenga Guimarães

Viabilidade Econômica da Geração de Energia Elétrica Com Biogás: Aproveitamento do Biogás Oriundo do Lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Barra Mansa - RJ

Dissertação apresentada a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação e Capacitação Profissional/Coordenação do Mestrado Profissional em Ciências Ambientais da Universidade de Vassouras, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais

Banca Examinadora sugerida:

Orientador:

Prof. Dr. Sandro Pereira Ribeiro, Univassouras

Doutor pela Universidade Federal de Juiz de Fora – Juiz de Fora, Brasil

Prof. Dr. Adiel Queiroz Ricci, Univassouras

Doutor pela Universidade Federal Fluminense, UFF, Brasil

Prof. Dr. Bárbara Louise Lemos Drumonde Silva, UBM

Doutor pela (Universidade Federal Fluminense, UFF, Brasil

Prof. Dr. Cristiane Borborema Chaché, Univassouras

Doutor pela Universidade Federal Fluminense, UFF, Brasil

Vassouras
2025



Guimarães, Fábio Luís Alvarenga

Viabilidade Econômica da Geração de Energia Elétrica Com Biogás:
Aproveitamento do Biogás Oriundo do Lodo da Estação de Tratamento de
Esgoto de Barra Mansa - RJ / Fábio Luís Alvarenga Guimarães. - Vassouras:
2025.

xviii, 120 f. : il. ; 29,7 cm.

Orientador: Sandro Pereira Ribeiro.

Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Mestrado Profissional
em Ciências Ambientais - Universidade de Vassouras, 2025.

Inclui Ilustrações, Bibliografias e Material Anexo.

I. Energia renovável. 2. mercado de energia elétrica. 3. pay-back. I.
Ribeiro, Sandro Pereira. II. Universidade de Vassouras. III. Título.

Ata da Defesa de Dissertação (Mestrado Profissional em Ciências Ambientais)

Aos trinta dias do mês de setembro de 2025, às quatorze horas, via videoconferência, reuniu-se em sessão pública a Comissão Examinadora constituída pelos professores Dr. Sandro Pereira Ribeiro (Universidade de Vassouras), Dr^a. Cristiane Borborema Chaché (Universidade de Vassouras), Dr. Adiel Queiroz Ricci (Universidade de Vassouras) e Dr^a. Bárbara Louise Lemos Drumond Silva (Centro Universitário Barra Mansa), sob a presidência do primeiro, para a Defesa da Dissertação do Mestrando **Fábio Luís Alvarenga Guimarães**, intitulada: **"Viabilidade Econômica da Geração de Energia Elétrica com Biogás: Aproveitamento do Biogás oriundo do Lodo da Estação de Tratamento de Esgoto de Barra Mansa-RJ"**.

A banca deliberou: **APROVADO**

Vassouras, 30 de setembro de 2025.

Documento assinado digitalmente
gov.br SANDRO PEREIRA RIBEIRO
Data: 02/10/2025 14:36:47-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr. Sandro Pereira Ribeiro
Orientador

CRISTIANE
BORBOREMA CHACHE Assinado de forma digital por
CRISTIANE BORBOREMA CHACHE
Dados: 2025.10.03 12:14:29 -03'00'

Dr^a. Cristiane Borborema Chaché
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente
gov.br ADIEL QUEIROZ RICCI
Data: 02/10/2025 14:44:56-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Adiel Queiroz Ricci
Examinador Interno

Documento assinado digitalmente
gov.br BARBARA LOUISE LEMOS DRUMOND SILVA
Data: 02/10/2025 21:31:54-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Dr^a. Bárbara Louise Lemos Drumond Silva
Examinador Externo

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas as pessoas que, com coragem e perseverança, demonstram a verdadeira força da resiliência. Àquelas que, diante das dificuldades, persistem com determinação e sempre encontram formas de seguir em frente, transformando desafios em conquistas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha imensa gratidão à minha esposa, pelo apoio incondicional, paciência e amor durante toda a jornada deste mestrado. Sua presença constante foi fundamental para que eu pudesse seguir em frente, mesmo nos momentos mais difíceis.

Agradeço ao meu orientador, Sandro, pela orientação valiosa, dedicação e paciência. Suas contribuições e incentivo fizeram toda a diferença na realização deste trabalho.

Aos amigos que fiz ao longo do mestrado, minha gratidão pela parceria, pelas trocas de ideias e pelo apoio mútuo. Cada um de vocês contribuiu de maneira especial para minha trajetória acadêmica.

À coordenação do curso da Universidade de Vassouras, agradeço pelo suporte e pela organização que proporcionaram ao longo de todo o processo, facilitando o andamento do meu trabalho.

Não poderia deixar de agradecer também ao apoio recebido do Centro Universitário Barra Mansa, que foi essencial para a realização desta conquista.

A todos, meu muito obrigado!

Meu nome é Fábio Luís Alvarenga Guimarães, nascido no Brasil, tenho 58 anos e construí minha trajetória profissional no setor elétrico ao longo de mais de três décadas de dedicação. Desde jovem, iniciei minha formação técnica em Eletrotécnica e, posteriormente, graduei-me em Engenharia Elétrica pela Universidade Severino Sombra (1999). Com o passar dos anos, busquei constante aprimoramento acadêmico e profissional, realizando especializações em Engenharia de Manutenção Industrial, Gestão Empresarial e Capacitação em Engenharia Elétrica, até chegar ao meu ingresso no Mestrado Profissional em Ciências Ambientais pela Universidade de Vassouras (2023), no qual busco alinhar minha experiência prática com uma visão sustentável e inovadora para o setor energético.

Minha carreira é marcada por uma ampla atuação em diferentes segmentos: distribuição de energia elétrica, ferrovias, indústria automotiva, petróleo e gás. Trabalhei em empresas de grande relevância como LIGHT, ENEL Rio, PSA-Peugeot Citroën, além de ter atuado em projetos estratégicos para a Petrobras no COMPERJ. Em cada etapa, acumulei vivências tanto técnicas quanto de gestão, envolvendo desde a elaboração de projetos e manutenção de sistemas elétricos até o planejamento e supervisão de equipes multidisciplinares.

Além da experiência no setor elétrico, desde 2022 atuo como docente no Centro Universitário de Barra Mansa (UBM), ministrando disciplinas relacionadas à Engenharia Elétrica, como Análise de Sistemas de Potência, Subestações de Potência, Estabilidade do Sistema Elétrico, Proteção do Sistema Elétrico e Sistemas de Distribuição Elétrica, entre outras. Essa atuação acadêmica representa não apenas a transmissão de conhecimento, mas também a oportunidade de formar novos profissionais e contribuir para o fortalecimento da área elétrica no cenário regional.

Atualmente, desempenho minhas atividades como Engenheiro Eletricista no SAAE Barra Mansa, onde sou responsável por projetos de média tensão, estudos de proteção e eficiência energética. A partir de 2021, assumi também a presidência da Comissão de Conservação de Energia no SAAE de Barra Mansa, reforçando meu compromisso com a sustentabilidade e a busca por soluções inovadoras.

Minha jornada profissional reflete um constante desafio: integrar conhecimento técnico sólido, experiência prática e inovação para responder às demandas de um setor em transformação. O ingresso no mestrado representa a continuidade dessa busca, agora com foco na geração de energia a partir de fontes renováveis, especialmente o biogás, como alternativa para ampliar a eficiência, reduzir custos e promover o desenvolvimento sustentável.

RESUMO

Com o avanço das crises energéticas e a crescente demanda por fontes renováveis de baixo custo, o biogás tem se destacado como uma alternativa viável e ambientalmente sustentável. Proveniente da decomposição de resíduos orgânicos, esse combustível representa uma forma eficiente de transformar materiais que seriam descartados em fonte de energia com valor agregado. Neste contexto, o presente estudo tem como foco a análise do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás obtido do lodo gerado em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) localizada no município de Barra Mansa, estado do Rio de Janeiro. A partir de dados técnicos do projeto da unidade, atualmente em fase de planejamento, foi estimada a produção de biogás e seu respectivo potencial energético anual. Com base na vazão média prevista e na caracterização do lodo, estimou-se uma produção significativa de energia elétrica, evidenciando a viabilidade de utilização local do biogás como fonte complementar. Paralelamente, foi avaliado o potencial de geração energética da região considerando a possibilidade de expansão do sistema de esgotamento sanitário para a totalidade da população urbana. A análise de viabilidade econômica foi conduzida por meio dos indicadores Valor Presente Líquido (VPL) e payback, os quais demonstraram a atratividade do investimento. Além disso, foram identificados benefícios ambientais relevantes, como a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e a redução do impacto ambiental associado ao descarte de resíduos, reforçando o papel estratégico desse tipo de iniciativa na sustentabilidade e na gestão eficiente dos recursos. Os resultados apontam que o aproveitamento energético do biogás oriundo do lodo de ETE pode representar uma solução eficaz e replicável para impulsionar o saneamento ambiental e a produção de energia renovável em municípios de médio porte como Barra Mansa.

Palavras-chave: Energia renovável, mercado de energia elétrica, pay-back

ABSTRACT

Amid growing energy challenges and the increasing demand for low-cost renewable sources, biogas has emerged as a viable and environmentally sustainable alternative. Produced through the decomposition of organic waste, this fuel offers an efficient way to convert discarded materials into value-added energy. This study focuses on analyzing the potential for electricity generation from biogas obtained from sludge produced by a Wastewater Treatment Plant (WWTP) in Barra Mansa, Rio de Janeiro. Using technical data from the plant project, currently in the planning phase, the annual biogas production and corresponding energy potential were estimated. Considering the average flow rate and sludge characteristics, a significant electricity output was predicted, demonstrating the feasibility of using biogas locally as a complementary energy source. Additionally, the regional energy generation potential was assessed, considering possible expansion of the sanitation system to cover the entire urban population. Economic feasibility was evaluated using Net Present Value (NPV) and payback indicators, which confirmed the attractiveness of the investment. Relevant environmental benefits were also identified, including greenhouse gas emission mitigation and reduced environmental impact from waste disposal. The results indicate that energy recovery from WWTP sludge biogas represents an effective and replicable solution to promote environmental sanitation and renewable energy generation in medium-sized municipalities like Barra Mansa.

Key-words: Renewable energy, electricity market, pay-back

FIGURA 1 – Saneamento – atividades relacionadas.....	22
FIGURA 2 – Tipos de tratamento.....	25
FIGURA 3 – Esquema de funcionamento de um biodigestor tipo UASB ..	28
FIGURA 4 – Arranjo de UASB.....	30
FIGURA 5 – Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia	32
FIGURA 6 – Diagrama de um sistema de gases para reatores UASB de pequeno porte.....	34
FIGURA 7 – Ciclo sustentável do biogás.....	36
FIGURA 8 – Potencial de biogás a curto prazo de estações de tratamento de esgoto no Brasil.....	38
FIGURA 9 – Potencial de produção de biogás dos cenários analisados para a região sudeste....	39
FIGURA 10 – Escolha da aplicação do biogás.....	41
FIGURA 11 – Objetivos do desenvolvimento sustentáveis.....	42
FIGURA 12 – Turbina à gás.....	45
FIGURA 13 – Microturbina à gás.....	46
FIGURA 14 – Sistema de geração de energia elétrica com microturbinas a biogás.....	47
FIGURA 15 – Ciclo de quatro tempos.....	48
FIGURA 16 – Moto - gerador.....	49
FIGURA 17 – Fluxograma para solicitação de acesso ou consulta de acesso de micro GD.....	53
FIGURA 18 – Modelos de negócio no setor elétrico.....	55
FIGURA 19 – Oferta interna de energia elétrica por fonte.....	56
FIGURA 20 – Mapa do estado do Rio de Janeiro.....	58
FIGURA 21 – Bacias de esgotamento sanitário de Barra Mansa.....	62
FIGURA 22 – População e carga orgânica para vazão úmida – ETE 1 – Saudade.....	63
FIGURA 23 – Queimador tipo flare.....	67
FIGURA 24 – Gasômetro.....	70
FIGURA 25 – Fluxo de caixa de um projeto.....	78
FIGURA 26 – Tarifas de média tensão elétrica – tarifa verde.....	84
FIGURA 27 – Tarifas de média tensão elétrica – tarifa azul – Light.....	85
FIGURA 28 – Projeção do payback – estudo ETE Saudade.....	86
FIGURA 29 – Taxa selic.....	87
FIGURA 30 – Análise de fluxo de caixa por ano – ETE Saudade.....	89

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Etapa de tratamento de esgoto	27
TABELA 2 – População e carga orgânica para vazão úmida – ETE Saudade.....	64
TABELA 3 – Dado da produção de biogás da ETE Saudade.....	80
TABELA 4 – Cálculo do custo de investimento – capex ETE Saudade.....	82
TABELA 5 – Custo com a produção de eletricidade – ETE Saudade.....	83
TABELA 6 – Receita tarifa horo – sazonal verde e tarifa horo - sazonal azul.....	85
TABELA 7 – Análise do fluxo de caixa por ano – ETE Saudade.....	88
TABELA 8 – Análise da taxa de desconto de investimento – ETE Saudade.....	90

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – Biogás gerado no saneamento: perspectivas, benefícios e desafios setoriais	52
QUADRO 2 – Fases do processo de tratamento do biogás da ETE Saudade.....	65
QUADRO 3 - Relação dos principais equipamentos elétricos de força da ETE Saudade.....	68
QUADRO 4 – Composição do capex.....	72

LISTA DE SIGLAS

ABiogás	Associação Brasileira das Empresas de Biogás e Biometano.
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível
BEN	Balanco Energético Nacional
BEP	Programa de Energia Para o Brasil
BEP	Programa de Energia Para o Brasil
Bio-GNL	Biometano liquefeito
CF	Coliformes fecais
CH ₄	Metano
CIBiogás	Centro Internacional de Energias Renováveis – Biogás
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Codevasf	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
COP	Regime Contínuo
COP21	21ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
COP26	26ª Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
COT	Carbono Orgânico Total
CT	Coliformes totais
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EDTA	Ácido etilenodiaminotetra-acético
EF	Estreptococos fecais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ESP	Modo Stand-b
ETA	Estações de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Fe	Ferro
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
GD	Geração distribuída
GEE	Gás de Efeito Estufa
GWP	Potencial de aquecimento global
H ₂	Hidrogênio
H ₂ PO ₄ ⁻	Dihidrogenofosfato
H ₂ S	Sulfeto de hidrogênio



H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico
Hg	Mercurio
HPO ₄ ²⁻	Hidrogenofosfato
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICLEI	<i>International Council for Local Environmental Initiatives</i>
LTP	Regime Prime
MCI	Motores de combustão interna
MME	Ministério de Minas e Energia
MMGD	Micro e minigeração distribuída
MMGD	Geração Distribuída de Médio Porte
MWh	Megawatt-hora.
MWh	Megawatt-hora
N ₂	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira Registrada
NH ₃	Amônia
NH ₄ ⁺	Amônia ionizada
Nm ³	Normal metro cúbico
NO ₂ ⁻	Nitrito
NO ₃ ⁻	Nitrato
NO _x	Óxidos de nitrogênio
O ₂	Oxigênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
Pb	Chumbo
PCI	poder calorífico inferior
pH	Potencial hidrogeniônico
Plansab	Plano Nacional de Saneamento Básico
PO ₄ ³⁻	Ortofosfato (fosfato)
PROBIOGÁ	
S	Projeto de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil
PRP	Regime Prime Variável
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i>
ReCESA	Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental
REN	Resolução Normativa
SAAE-BM	Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Barra Mansa
SCEE	Sistema de Compensação de Energia Elétrica
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e de Custód
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
SO ₃ ²⁻	Sulfito
SO ₄ ²⁻	Sulfato
SO _x	Óxidos de enxofre
TE	Tarifa de Energia
TIR	Taxa interna de retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade



UNIVERSIDADE DE
vassouras

TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
TUST	Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UC	unidade consumidora
UV	Radiação ultravioleta
VPL	Valor Presente Líquido



SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	17
2.	OBJETIVOS	20
	2.1 Objetivo Geral	20
	2.2 Objetivos Específicos	20
3.	MÉTODOS	21
	3.1 Saneamento.....	21
	3.1.1 Esgotamento sanitário.....	22
	3.1.2 Características de esgoto doméstico.....	23
	3.1.3 Tratamento de esgoto.....	25
	3.2 Reator UASB.....	27
	3.2.1 Dimensionamento do reator UASB	28
	3.3 Biogás	30
	3.3.1 Produção e característica do biogás na digestão anaeróbia	31
	3.3.2 Considerações sobre a produção e a segurança do biogás	33
	3.3.3 Dispositivos de segurança para sistemas de biogás.....	34
	3.3.4 O biogás como fonte energética sustentável no saneamento básico.....	35
	3.3.5 Potencial energético do biogás no saneamento brasileiro	36
	3.3.6 Projeções energéticas do biogás a partir do tratamento de esgoto na região sudeste até 2033	38
	3.3.7 Purificação e aproveitamento energético do biogás: tecnologias, normas e potencial no Brasil	39
	3.3.8 O papel do biogás na implementação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS)	41
	3.4 Geração de Energia Elétrica à Partir do Biogás : Aplicações, Armazenamento e Diretrizes Técnicas	43
	3.4.1 Turbinas à gás	44



3.4.2 Microturbinas à gás	45
3.4.3 Motor de combustão interna – Ciclo Otto.....	47
3.5 Mercado de Energia Elétrica.....	50
3.5.1 Geração distribuída de energia elétrica	51
3.5.2 Micro e minigeração distribuída	52
3.5.3 Políticas energéticas	53
3.5.4 Estrutura tarifária e sistemas de medição na distribuição de energia elétrica.....	56
RESULTADOS E PRODUTO	58
4.1 Características do Projeto da ETE.....	60
4.2 Parâmetros de Dimensionamento da ETE.....	62
4.2.1 Vazões e cargas de DBO afluentes à ETE	63
4.2.2 Características do afluente ao sistema de tratamento adotadas	63
4.2.3 Tratamento adotado	64
4.3 Características Gerais da ETE Saudade.....	65
4.3.1 Unidades do Tratamento Biológico Anaeróbio	66
4.3.2 Cargas elétricas de força da ETE Saudade.....	68
4.4 Potencial Energético do Biogás Gerados em Reatores UASB	69
4.4.1 Dimensionamento de gasômetro para armazenamento de biogás	69
4.5 Estimativa de Custos	71
4.5.1 Custo de produção de eletricidade a partir do biogás em uma ETE.....	73
4.5.2 Cálculo da receita gerada	73
4.6 Viabilidade Econômica.....	74
4.6.1 Payback simples	75
4.6.2 Payback descontado.....	76
4.6.3 Valor Presente Líquido (VPL)	76
4.6.4 Taxa Interna de retorno (TIR).....	79
4.7. Produto	79
4.7.1 Cálculo da produção do biogás	80
4.7.2 Cálculo da produção de energia elétrica.....	81



4.7.3	Cálculo dos custos de investimentos – Capex	82
4.7.4	Cálculo dos custos de manutenção e operação – Opex.....	82
4.8	Análise Financeira	82
4.8.1	Custo da produção de eletricidade.....	82
4.8.2	Receita com a produção de eletricidade	83
4.8.3	Payback	86
4.8.4	Valor Presente (VPL)	87
4.8.5	Taxa Interna de Retorno (TIR).....	89
5	DISCUSSÃO	91
5.1	Aplicabilidade da Energia Gerada a Partir do Biogás em ETE : Estudo de Caso Para o Município de Barra Mansa – RJ	91
5.2	Impacto na Sociedade.....	92
6	CONCLUSÕES	94
	REFERÊNCIAS	96
	APÊNDICE 1	103
	APÊNDICE 2	109
	ANEXO	118

1. INTRODUÇÃO

De acordo com dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), a população do Brasil aumentou 6,5% entre os anos de 2010 e 2022, atingindo 203,1 milhões de habitantes. Isso representa um acréscimo de 12,3 milhões de pessoas em relação ao Censo de 2010. Esse crescimento demográfico intensifica a necessidade de expansão da infraestrutura urbana para atender às novas demandas, o que, por sua vez, gera impactos significativos sobre o meio ambiente, especialmente no que diz respeito à gestão de resíduos.

Para enfrentar esse cenário, foi instituído o Marco Legal do Saneamento Básico (Lei Federal nº 14.026, de 15 de julho de 2020), que estabelece metas ambiciosas: até 2033, os municípios devem alcançar 99% de cobertura com abastecimento de água potável e 90% com coleta e tratamento de esgoto. Atingir esses objetivos requer o desenvolvimento de estratégias sustentáveis para o gerenciamento dos resíduos gerados, com foco em metodologias que promovam processos produtivos mais limpos e menos agressivos ao ambiente.

Uma das alternativas promissoras é o reaproveitamento do lodo oriundo das Estações de Tratamento de Água (ETA) e das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), transformando esse resíduo em fonte de energia renovável.

Segundo o Manual de Saneamento da Fundação Nacional de Saúde (FUNASA, 2006), o esgoto doméstico tem origem principalmente em residências, estabelecimentos comerciais e instituições que utilizam instalações como banheiros, cozinhas e lavanderias. Sua composição é majoritariamente formada por água de banho, excretas, materiais biodegradáveis (como papel higiênico), restos alimentares, sabões, detergentes e água de lavagem.

Silva (2020) destaca que o principal objetivo das ETE é tratar o esgoto sanitário, eliminando poluentes e organismos causadores de doenças, de modo a garantir que os efluentes lançados no meio ambiente estejam dentro dos limites legais de qualidade.

Apesar do potencial do biogás como fonte energética, sua aplicação ainda é limitada no setor de saneamento brasileiro (Lobato, 2011). Os recursos naturais são fundamentais para a sobrevivência dos seres vivos e a manutenção dos ecossistemas. Com o avanço das tecnologias e o aumento da viabilidade econômica de processos sustentáveis, cresce também o interesse por alternativas que conciliem desenvolvimento e preservação ambiental.

Nesse contexto, as ETE desempenham um papel importante ao tratar águas residuais urbanas e industriais, contribuindo para a proteção de corpos hídricos e para a gestão eficiente dos recursos hídricos.

A conversão de resíduos em energia é um exemplo claro da interseção entre sustentabilidade ambiental e economia circular, e a poluição por outro lado, é resultado direto das atividades humanas e provoca mudanças indesejáveis no meio ambiente. Poluentes sólidos, líquidos ou gasosos impactam negativamente o ar, a água e o solo. Para mitigar esses efeitos, legislações ambientais definem parâmetros e indicadores de qualidade, como os níveis de CO, NO_x, SO_x e Pb no ar; O₂, fenóis, mercúrio, pH e temperatura na água; além de índices como a erosão do solo.

Os resíduos também podem ser classificados conforme sua origem: pontuais (como o lançamento de esgoto doméstico e industrial, emissões gasosas e disposição em aterros) ou difusos (como o uso de agrotóxicos ou a emissão de poluentes por veículos).

Diante desse panorama de crescimento populacional e agravamento dos impactos ambientais, torna-se essencial buscar soluções que convertam os desafios em oportunidades. A valorização do lodo como fonte energética é uma dessas soluções, com potencial para gerar benefícios ambientais, sociais e econômicos.

No município de Barra Mansa, no estado do Rio de Janeiro, os dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2023) revelam que apenas 0,5% do esgoto gerado é tratado, sendo este um índice muito baixo diante de uma população urbana estimada em cerca de 170 mil habitantes. No Distrito Sede, por exemplo, não há qualquer forma de tratamento dos efluentes coletados.

Com base no Processo Administrativo do SAAE nº 5829/2018, o Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Barra Mansa (SAAE-BM) prevê a construção da Estação de Tratamento de Esgoto – ETE Saudade, localizada justamente nesse distrito, e que será foco deste estudo.

A proposta consiste em aproveitar o lodo gerado nessa futura estação como matéria-prima para a geração de energia elétrica, reduzindo os custos operacionais e possibilitando retorno financeiro e ganhos ambientais. Essa abordagem está alinhada aos princípios da sustentabilidade, ao transformar resíduos que antes seriam descartados em recursos úteis, promovendo a economia circular e reduzindo os impactos ambientais.. , um resíduo que antes seria descartado como poluente pode ser convertido em um recurso valioso para a produção de energia renovável.

A geração de biogás a partir do lodo oriundo das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) representa um avanço relevante na gestão de resíduos sólidos, além de se configurar como uma alternativa viável para a produção de energia renovável. Essa proposta está diretamente relacionada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). No caso deste projeto contempla as ODS3, ODS6, ODS7, ODS8, ODS11 e ODS12.

O biogás é produzido por meio da decomposição da matéria orgânica em condições anaeróbias, ou seja, na ausência de oxigênio. Nesse ambiente, microrganismos realizam a digestão do material, resultando em uma mistura gasosa composta principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de pequenas proporções de outros elementos, como nitrogênio, hidrogênio e sulfeto de hidrogênio (H_2S).

Os insumos utilizados nesse processo incluem, entre outros, resíduos agrícolas, restos de alimentos, dejetos animais e, em particular, o lodo gerado pelas ETE.

Como parte da pesquisa, será realizada uma análise comparativa entre diferentes tecnologias de conversão do biogás em energia, tais como turbinas a gás, microturbinas, turbinas a vapor e motores de combustão interna. Essa avaliação abrangerá aspectos como eficiência energética, custos de instalação e operação, e exigências relacionadas à manutenção dos equipamentos.

Além disso, o estudo incluirá uma avaliação do desempenho energético dos sistemas analisados, levando em conta fatores como perdas durante o processo, rendimento global das tecnologias e possibilidades de otimização. Com base nesses dados, será estimada a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada a partir do biogás produzido, considerando tanto a capacidade técnica dos sistemas quanto a disponibilidade da matéria-prima.

Por fim, foram realizadas análises econômicas que envolveram a quantificação da energia gerada e a viabilidade financeira do projeto. Foram aplicados indicadores como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o tempo de retorno do investimento payback. Essas informações permitiram avaliar o potencial da proposta como uma solução sustentável, que alia o tratamento adequado de resíduos ao aproveitamento energético, em consonância com os princípios da economia circular e da sustentabilidade ambiental.

2. OBJETIVOS

Neste capítulo, foram apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação, os quais orientaram a proposta de aproveitamento do lodo gerado na futura Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Saudade, como fonte alternativa de matéria-prima para a geração de energia elétrica.

2.1 Objetivo Geral

Elaborar um relatório técnico voltado ao SAAE de Barra Mansa , com o propósito de avaliar a viabilidade técnica e eficácia da utilização do lodo proveniente da futura Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) Saudade, como fonte de matéria-prima para a geração de energia elétrica, utilizando os dados referencias do projeto da própria ETE Saudade.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Compreender os processos de produção de biogás a partir do lodo gerado nas ETE, com foco na digestão anaeróbia como tecnologia principal;
- b) Identificar e analisar as tecnologias disponíveis para conversão do biogás em energia elétrica, considerando eficiência, custo e manutenção;
- c) Quantificar o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na ETE analisada e avaliar sua eficiência energética com foco na mitigação dos custos operacionais e na viabilidade de autossuficiência energética;
- d) Realizar a análise de desempenho energético do sistema, considerando perdas, rendimento e possibilidade de otimização;
- e) Avaliar a viabilidade econômica do processo, por meio de indicadores como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e tempo de retorno do investimento (payback);
- f) Propor uma abordagem integrada entre o tratamento de resíduos e a geração de energia, contribuindo para o desenvolvimento de soluções ambientalmente sustentáveis no setor de saneamento.
- g) Elaborar Estudo de Viabilidade Técnica.
- h) Elaborar Plano Financeiro

3. MÉTODOS

A metodologia deste trabalho teve caráter exploratório e descritivo, fundamentada em dados secundários obtidos a partir de um projeto existente de construção de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), com foco na avaliação do potencial energético do lodo gerado. O estudo buscou analisar a viabilidade técnica e econômica da utilização desse lodo como fonte de geração de energia elétrica, com base em informações técnicas e operacionais já disponibilizadas no projeto original.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de consolidar o conhecimento técnico sobre a composição química e física do lodo de ETE. Foram consultadas fontes como livros especializados, artigos acadêmicos e publicações científicas que abordaram os principais parâmetros do lodo, incluindo teor de matéria orgânica, nutrientes, metais pesados e outros compostos relevantes para a geração de biogás.

Em seguida, foram analisados dados referentes à Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e à Demanda Química de Oxigênio (DQO) do esgoto sanitário e do lodo relacionados ao projeto da ETE em estudo. Esses indicadores são essenciais para estimar a carga orgânica disponível para digestão anaeróbia e, consequentemente, o potencial de produção de biogás.

Com base nessas informações, foi feita uma avaliação das tecnologias disponíveis para conversão do biogás em energia elétrica, considerando os dados técnicos do projeto e os parâmetros de eficiência energética, custo, operação e manutenção.

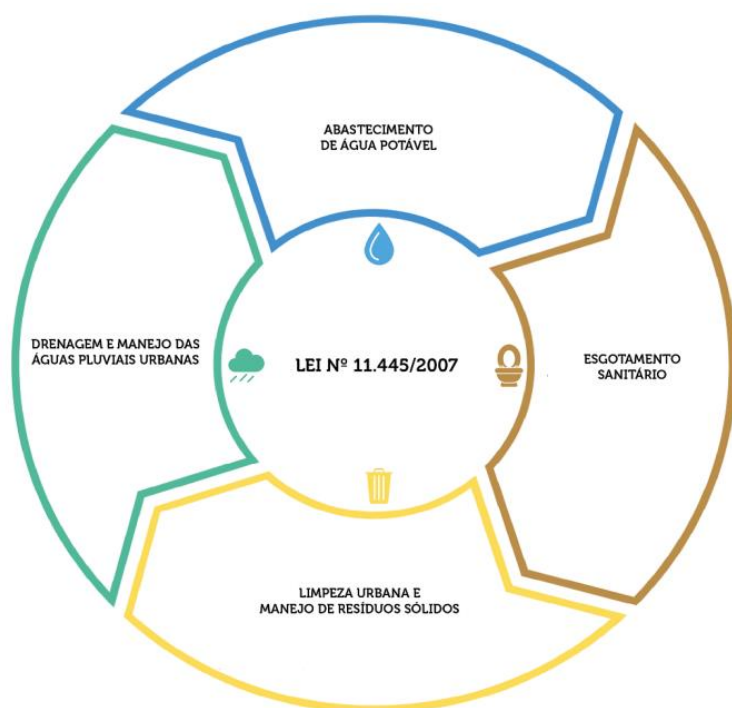
A escolha do sistema mais adequado foi orientada pelos objetivos de autossuficiência energética e mitigação de custos operacionais da estação.

Por fim, foi desenvolvida uma análise de viabilidade econômica, com o uso de indicadores como o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Período de Recuperação do Investimento (Payback).

A partir desses resultados, será possível avaliar se a aplicação prática do aproveitamento energético do lodo representa uma alternativa sustentável e financeiramente vantajosa para o projeto em questão.

3.1 Saneamento

A Lei Federal nº 11.445/2007, atualizada pela Lei Federal nº 14.026/2020, estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, definindo-o como o conjunto de serviços públicos, infraestruturas e instalações operacionais destinados a garantir o abastecimento de água potável, o esgotamento sanitário, a limpeza urbana e o manejo de resíduos sólidos, além da drenagem e do controle das águas pluviais em áreas urbanas. Essa definição abrange os principais eixos do saneamento, conforme ilustrado na Figura 1.



Fonte: Figura adaptada pelo autor - DIAGNÓSTICO SNIS-AE, 2019

A lei cita que a prestação dos serviços de saneamento básico deve ocorrer de maneira articulada, assegurando a integração entre seus quatro componentes e sua vinculação com políticas públicas voltadas ao desenvolvimento urbano e regional, habitação, redução da pobreza, proteção ambiental, promoção da saúde, gestão dos recursos hídricos, entre outras iniciativas sociais. O propósito central é a melhoria das condições de vida da população, reconhecendo o saneamento como um pilar fundamental nesse processo.

3.1.1 Esgotamento sanitário

De acordo com a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA, 2006), os resíduos provenientes da atividade humana, como os dejetos, representam um risco significativo à saúde pública, pois podem atuar como vetores de doenças como febre tifoide, infecções intestinais e amebíase. Por essa razão, é essencial impedir seu contato direto com pessoas, água potável, alimentos e vetores biológicos como moscas e baratas.

A gestão segura desses resíduos tem como finalidade a prevenção de enfermidades, a proteção dos recursos naturais, especialmente solo e água, o controle de vetores, a promoção de práticas de higiene e a melhoria das condições de conforto e salubridade ambiental. A ausência de

saneamento adequado está diretamente ligada à propagação de doenças, impactando negativamente a saúde da população e sua capacidade produtiva.

Conforme definido pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2019), o esgotamento sanitário compreende um conjunto de ações e estruturas destinadas à coleta, transporte, tratamento e destinação final dos esgotos, seja por meio de descarte ambientalmente seguro ou de reuso.

Segundo a Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental - ReCESA, (Ministério das Cidades, 2008), a quantidade de esgoto gerado por uma comunidade está diretamente relacionada ao consumo de água da população. Estima-se que cerca de 80% da água utilizada em residências retorna ao sistema como esgoto doméstico.

Mendonça (2016) classifica as águas residuais com base em sua origem. As domésticas referem-se às águas utilizadas para higiene pessoal e limpeza, que contêm resíduos humanos e efluentes de estabelecimentos residenciais, comerciais e institucionais. Já os efluentes industriais são provenientes dos processos produtivos e apresentam características específicas, de acordo com o tipo de indústria. Há ainda as águas de infiltração e vazões adicionais, que correspondem àquelas que entram no sistema de esgoto devido a falhas estruturais, como juntas mal vedadas, fissuras em tubulações, poços de visita e estações de bombeamento.

3.1.2 Características dos esgotos domésticos

A composição do esgoto sanitário está diretamente relacionada ao uso que a água recebeu antes de ser descartada, sendo influenciada por fatores como clima, condições socioeconômicas e hábitos de consumo da população. Segundo o manual do ICLEI (2010), embora sua composição possa variar de acordo com essas condições, de forma geral os esgotos são constituídos por aproximadamente 99,9% de água e apenas 0,1% de carga poluidora. Essa fração poluente, apesar de pequena em volume, concentra substâncias que exigem tratamento específico antes do descarte, a fim de evitar impactos ao meio ambiente e à saúde pública.

A caracterização dos esgotos é essencial para o dimensionamento e eficiência dos sistemas de tratamento. Para isso, são utilizadas análises físicas, químicas e biológicas que determinam os principais parâmetros de qualidade, como a presença de sólidos, matéria orgânica, nutrientes e microrganismos patogênicos. Os sólidos encontrados nos esgotos podem ser classificados de diversas formas: quanto ao tamanho e estado físico, distinguem-se entre sólidos em suspensão, coloidais e dissolvidos; quanto à capacidade de sedimentação, em sólidos sedimentáveis e não

sedimentáveis; e quanto à composição química, em sólidos fixos (inorgânicos e não biodegradáveis) e sólidos voláteis (orgânicos e biodegradáveis).

A matéria orgânica presente nos esgotos é formada por uma variedade de compostos, como proteínas, carboidratos, lipídios, ureia e detergentes. Esses materiais podem estar dissolvidos ou suspensos, e sua natureza pode ser biodegradável ou não. A quantificação da matéria orgânica pode ser feita diretamente, por meio da medição do Carbono Orgânico Total (COT), ou indiretamente, por indicadores como a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO). A DBO mede a quantidade de oxigênio consumido por microrganismos aeróbios durante a degradação da matéria orgânica ao longo de cinco dias, sendo um indicativo da fração biodegradável. A DQO, por sua vez, estima a quantidade total de oxigênio necessária para oxidar toda a matéria orgânica presente, utilizando reações químicas com agentes oxidantes fortes, como o dicromato de potássio. Embora a DQO ofereça uma estimativa mais rápida e ampla, ela pode superestimar a necessidade real de oxigênio para processos biológicos. Em esgotos domésticos, a DBO média gira em torno de 300 mg/L, e a razão DQO/DBO varia entre 1,7 e 2,4, indicando alta biodegradabilidade.

O nitrogênio, elemento fundamental para a atividade dos microrganismos envolvidos no tratamento biológico, pode estar presente em diferentes formas: nitrogênio molecular (N_2), nitrogênio orgânico, amônia (nas formas livre – NH_3 e ionizada – NH_4^+), nitrito (NO_2^-) e nitrato (NO_3^-). O processo de nitrificação transforma amônia em nitrato por meio da oxidação em duas etapas, com consumo de oxigênio e redução da alcalinidade do meio. Já a desnitrificação é a conversão do nitrato em gás nitrogênio sob condições anóxicas, também com consumo de oxigênio e alcalinidade, contribuindo para a remoção eficiente do nutriente.

Outro nutriente com potencial de impacto ambiental é o fósforo, que pode estar presente como ortofosfato (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, H_3PO_4), polifosfato ou fósforo orgânico. Os ortofosfatos são prontamente assimiláveis pelos microrganismos e predominam em águas residuais, enquanto os polifosfatos sofrem hidrólise e liberam ortofosfatos gradualmente. O fósforo orgânico está mais presente em lodos e efluentes industriais do que no esgoto bruto, e sua remoção é importante para evitar a eutrofização de corpos hídricos receptores.

A presença de microrganismos patogênicos nos esgotos é outro fator de risco importante. Como a identificação direta desses agentes é complexa, utilizam-se bactérias indicadoras de contaminação fecal, como coliformes totais, coliformes termo tolerantes e estreptococos fecais. Estes microrganismos estão frequentemente presentes nas fezes de humanos e animais de sangue quente, e sua detecção em amostras de esgoto serve como indicador da possível presença de patógenos, sendo fundamental para o controle sanitário e para a avaliação da eficiência dos processos de desinfecção.

3.1.3 Tratamento de esgoto

A ABNT NBR 12209:2011 é a norma brasileira que orienta a elaboração de projetos hidráulico-sanitários e estabelece os critérios técnicos para a concepção e o dimensionamento de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário (ETE). Essa norma fornece diretrizes quanto à apresentação e ao detalhamento dos projetos, assegurando que as soluções propostas atendam aos padrões exigidos de desempenho sanitário, ambiental e operacional, garantindo assim a eficiência no tratamento dos esgotos e a proteção dos corpos receptores.

Os esgotos gerados pelas atividades humanas são coletados por meio da rede pública de esgotamento e conduzidos até a ETE, onde passam por diferentes etapas de tratamento: preliminar, primário, secundário e, eventualmente, terciário (Jordão; Pessoa, 2011). O processo costuma iniciar com o tratamento preliminar, seguido do primário e secundário, sendo que o tratamento terciário é aplicado em casos mais específicos, quando há exigência de remoção adicional de poluentes. Na maioria das estações em operação no Brasil, o tratamento é realizado até o estágio secundário, o que já permite significativa remoção da carga orgânica presente.

A Figura 2 ilustra as principais etapas às quais o esgoto sanitário é submetido durante o processo de tratamento, evidenciando os tipos de processos aplicáveis em cada fase, desde a remoção física de sólidos até os tratamentos biológicos e químicos mais avançados.

Figura 2 – Tipos de tratamento



Fonte: Codesvasf, 2015

A primeira etapa do processo é o tratamento preliminar, que compreende operações físicas voltadas à separação de sólidos grosseiros presentes no esgoto. Conforme destaca o Instituto Trata Brasil (2012), essa fase é fundamental para preservar os equipamentos e garantir o desempenho das etapas seguintes.

São procedimentos típicos o gradeamento, que retém materiais volumosos; o desarenamento, responsável pela remoção de partículas minerais pesadas como areia e cascalho; e o desengorduramento, que separa óleos e graxas flutuantes.

Em alguns sistemas, também são adotadas práticas como o pré-arejamento e a equalização de vazões e cargas poluentes, com o objetivo de estabilizar o esgoto que chega à estação.

Superada essa fase inicial, o esgoto ainda apresenta elevada carga poluidora, exigindo a aplicação do tratamento primário, cuja função é remover a matéria orgânica e os sólidos em suspensão por meio da sedimentação. Neste estágio, os efluentes permanecem em tanques onde, sob ação da gravidade, os sólidos mais densos se depositam no fundo, formando o lodo primário.

Em certos casos, a eficiência dessa etapa pode ser aumentada com o uso de coagulantes e floculantes, que promovem a aglutinação das partículas mais finas.

Embora não elimine a matéria orgânica dissolvida, o tratamento primário pode remover até 60% da carga de sólidos suspensos, representando um passo importante na contenção da poluição.

A seguir, o esgoto é encaminhado para o tratamento secundário, onde predominam os processos biológicos. Segundo o Instituto Trata Brasil (2012), essa fase é conduzida por microrganismos aeróbios que decompõem a matéria orgânica remanescente no efluente. Sistemas como lodos ativados e filtros biológicos são comumente utilizados em reatores aerados, que garantem a oxigenação necessária para a atividade microbiana. Após esse processo, o líquido tratado passa pelos decantadores secundários, onde a biomassa gerada é separada, formando o lodo secundário.

A eficiência dessa etapa pode ultrapassar 90%, tornando o esgoto tratado adequado para descarte ou reuso, dependendo da legislação local e da sensibilidade do corpo hídrico receptor.

Em situações que requerem padrões mais rigorosos de qualidade da água, aplica-se o tratamento terciário, também conhecido como tratamento avançado. Essa etapa é voltada à remoção de nutrientes residuais (como fósforo e nitrogênio) e à desinfecção do efluente final.

A presença de nutrientes em excesso pode causar eutrofização, um fenômeno que resulta na proliferação de algas e desequilíbrio ecológico nos corpos receptores.

A desinfecção pode ser realizada por cloração, ozonização ou radiação ultravioleta (UV), com o objetivo de eliminar os microrganismos patogênicos que persistirem após o tratamento biológico.

Essa fase é especialmente importante em casos de reuso do efluente ou em regiões onde os corpos d'água são ambientalmente frágeis. Portanto, as etapas de tratamento do esgoto são interdependentes e complementares, devendo ser planejadas de forma integrada, conforme orienta a ABNT NBR 12209:2011, para assegurar um tratamento eficaz, sustentável e em conformidade com os padrões técnicos e ambientais.

A escolha da configuração ideal dependerá das características do esgoto, da localização da ETE e dos objetivos de qualidade do efluente final. Portanto, o tratamento terciário complementa as etapas anteriores, assegurando uma remoção mais completa dos poluentes e contribuindo para a proteção da saúde pública e do meio ambiente.

A Tabela 1, demonstra as etapas de tratamento de esgotos.

Tabela 1 – Etapa de tratamento de esgotos

Etapa	Objetivo Principal	Tipo de Processo
Pré-Tratamento	Remover sólidos grandes, areia, óleos e graxas	Físico
Tratamento Primário	Sedimentar poluentes mais densos	Físico
Tratamento Secundário	Remover matéria orgânica biodegradável	Biológico
Tratamento Terciário	Remover nutrientes, patógenos e poluentes finais	Químico/Físico/Avançado

Fonte: adaptada pelo autor, Codevasf, 2015.

3.2 Reator UASB

A sigla UASB refere-se à expressão em inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, que descreve um tipo de reator anaeróbio amplamente utilizado no tratamento de esgotos sanitários.

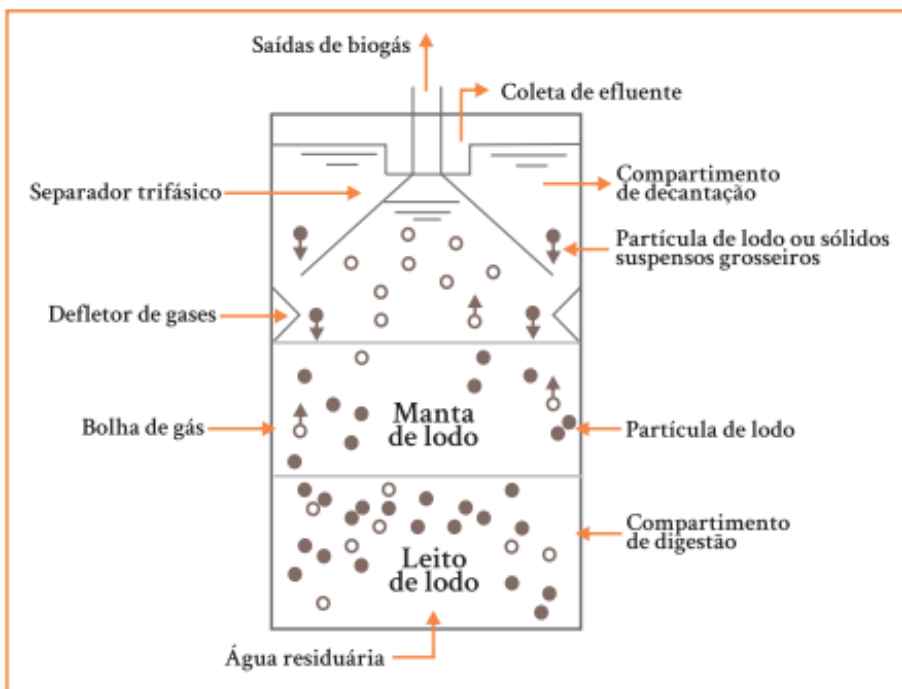
Esse sistema é caracterizado pelo escoamento ascendente do afluente através de uma manta biológica de lodo, promovendo a digestão anaeróbia da matéria orgânica.

No topo do reator, ocorre a separação das fases sólida, líquida e gasosa por meio de um dispositivo conhecido como separador trifásico, cuja função é otimizar a retenção de biomassa, o escoamento do efluente tratado e a coleta do biogás gerado no processo (Kunz, 2019).

De acordo com Kunz (2019), o reator UASB apresenta simplicidade construtiva, baixo custo operacional e boa eficiência na remoção de matéria orgânica, o que explica sua ampla utilização em estações de tratamento de esgoto no Brasil. Além disso, o sistema possibilita a produção de biogás, constituído principalmente por metano, que pode ser aproveitado como fonte de energia renovável. O lodo resultante do processo é estabilizado e, após tratamento adequado, pode ser destinado ao uso agrícola. Dessa forma, o UASB configura-se como uma tecnologia sustentável, de operação simples e economicamente viável, podendo ser integrada a outras etapas complementares de tratamento.

A Figura 3 abaixo, demonstra o funcionamento deste modelo de reator.

Figura 3 - Esquema de funcionamento de um biodigestor tipo UASB.



Fonte: Kunz (2019)

3.2.1 Dimensionamento do reator UASB

Para o dimensionamento de um biodigestor do tipo UASB, é fundamental considerar parâmetros operacionais como a carga orgânica volumétrica, a velocidade superficial ascendente e o volume efetivo de tratamento, que corresponde ao espaço ocupado pela manta de lodo, ou seja, pela biomassa ativa responsável pela degradação anaeróbia da matéria orgânica (Kunz, 2019). Acima dessa manta, existe ainda um volume adicional destinado ao separador trifásico, que atua na separação das fases sólida, líquida e gasosa. O volume nominal total do reator é obtido a partir da carga orgânica aplicada, conforme demonstrado na equação a seguir:

$$V_n = \frac{Q \times S_o}{COV} \quad (1)$$

Onde:

V_n = Volume nominal (m³)

Q = Vazão de afluente (m³.d⁻¹)

S_o = Concentração do afluente (kg_{sv}.m⁻³)

COV = Carga orgânica volumétrica (Kg_{sv}.m⁻³.d⁻¹)

Para determinar o volume total de líquido corrigido abaixo da coleta de gás é utilizado um fator de

correção, o qual indica a fração ocupada pela manta de lodo. Levando em conta o fator de correção, que pode variar entre 0,8 a 0,9, o volume total do reator pode ser calculado:

$$V_c = \frac{V_n}{E} \quad (2)$$

Onde:

V_c = Volume corrigido (m^3)

V_n = Volume nominal (m^3)

E = Fator de correção, (0,8 a 0,9) adimensional

A velocidade ascensional é outra variável importante para evitar arraste de biomassa e é encontrada relacionando-se a vazão do afluente com a área da seção transversal do biodigestor UASB:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (3)$$

Onde:

v = velocidade de ascensão ($m.h^{-1}$)

A = Área da seção transversal do UASB (m^2)

Q = Vazão de afluente ($m^3.h^{-1}$)

A velocidade de ascensão será dependente da disponibilidade da matéria orgânica presente no substrato.

A altura de líquido do biodigestor pode ser determinada utilizando-se a seguinte relação:

$$H_L = \frac{V_c}{A} \quad (4)$$

Onde:

H_L = altura do biodigestor com base no volume de líquido (m)

V_c = Volume corrigido (m^3)

A = Área da seção transversal do UASB (m^2)

A altura do coletor de gás é adicional à altura do biodigestor UASB, aproximadamente 25% a mais. Então, a altura total do UASB será:

$$H_T = H_L + H_G \quad (5)$$

Onde:

H_T = altura total do biodigestor (m)

H_L = altura do biodigestor com base no volume de líquido (m)

H_G = altura do coletor de gás (m)

Abaixo, segue a Figura 4, com o esquema de um reator de UASB com lodo ativado convencional

Figura 4 -Arranjo de UASB



Fonte: Probiogás, 2015

3.3 Biogás

Em ambientes urbanos, o esgoto sanitário surge como uma das fontes mais promissoras para a produção de biogás e biometano, conforme destacam Soares (2022). Esse potencial está relacionado às suas características físico-químicas, que favorecem a aplicação de tecnologias de biodigestão convencionais. A centralização dos sistemas de esgoto nas cidades também facilita a logística necessária para a implementação dessa tecnologia.

A biodigestão, em especial, é uma opção vantajosa, pois é baseada em processos biológicos relativamente simples, que não exigem sistemas complexos ou automação sofisticada para o tratamento eficaz dos esgotos urbanos.

Além disso, o biogás gerado nesse processo pode ser transformado em biometano, um combustível renovável que possui propriedades semelhantes ao gás natural, sendo apto para diversas aplicações, incluindo em veículos, residências e indústrias Ministério de Minas e Energia (ANP, 2020).

A purificação do biogás resulta na produção de biometano, que pode ser utilizado de forma similar ao gás natural, com a vantagem de ser uma fonte renovável. O biometano pode ser extraído de diversos resíduos orgânicos, como os originados da agricultura e do comércio, desde que livres de impurezas inorgânicas.

Após ser purificado, o biometano pode ser distribuído de diversas formas, seja por gasoduto virtual ou em sua versão liquefeita (Bio-GNL). No Brasil, a regulamentação do biometano é feita por meio das

resoluções ANP nº 886/2022 e nº 906/2022, que estabelecem as normas para a produção e comercialização desse combustível derivado de aterros e estações de esgoto, além de resíduos orgânicos provenientes de atividades rurais e comerciais.

3.3.1 Produção e características do biogás na digestão anaeróbia

A geração de biogás ocorre principalmente a partir da decomposição da matéria orgânica em ambientes sem oxigênio (este processo biológico é denominado digestão anaeróbia). Durante esse processo, microrganismos especializados quebram os compostos orgânicos, transformando-os em moléculas mais simples que, além de gerar energia, garantem a sobrevivência desses microrganismos (ICLEI, 2010). A decomposição anaeróbica ocorre naturalmente em ambientes como pântanos, áreas alagadas, plantações de arroz e aterros sanitários, além de ser amplamente utilizada em sistemas controlados para o tratamento de efluentes urbanos e industriais. O biogás resultante desse processo é uma mistura gasosa que pode variar em sua composição, dependendo do tipo de matéria orgânica utilizada e das condições ambientais em que ocorre a digestão anaeróbia.

O biogás gerado por meio da digestão anaeróbia é composto predominantemente por metano (CH_4), cuja concentração pode variar entre 50% e 70%, e por dióxido de carbono (CO_2), presente em 25% a 50%. Além desses, também são detectados, em menores quantidades, gases como hidrogênio (H_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2), os quais afetam diretamente tanto o poder calorífico quanto a necessidade de purificação do biogás antes de seu uso (ICLEI, 2010).

A digestão anaeróbia ocorre em etapas metabólicas sucessivas e interdependentes, cada uma conduzida por comunidades microbianas específicas. O processo se inicia com a hidrólise, onde macromoléculas são decompostas em compostos menores. Em seguida, na acidogênese, esses produtos são transformados em ácidos graxos voláteis, álcoois e outros intermediários. A fase de acetogênese converte esses compostos em ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono. A última etapa, a metanogênese, é realizada por arqueias metanogênicas, responsáveis pela formação do metano — o principal componente energético do biogás (Probiogás, 2015).

Nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), a produção de biogás ocorre principalmente a partir da digestão do lodo excedente e do esgoto bruto, oferecendo dupla vantagem: redução da carga poluente nos efluentes e geração de energia renovável. Essa abordagem contribui significativamente para tornar o sistema de tratamento mais autossuficiente e sustentável (Probiogás, 2015).

Sob o ponto de vista microbiológico, o reator anaeróbio funciona como um ecossistema cooperativo, no qual bactérias e arqueias interagem sinergicamente para degradar a matéria orgânica. O

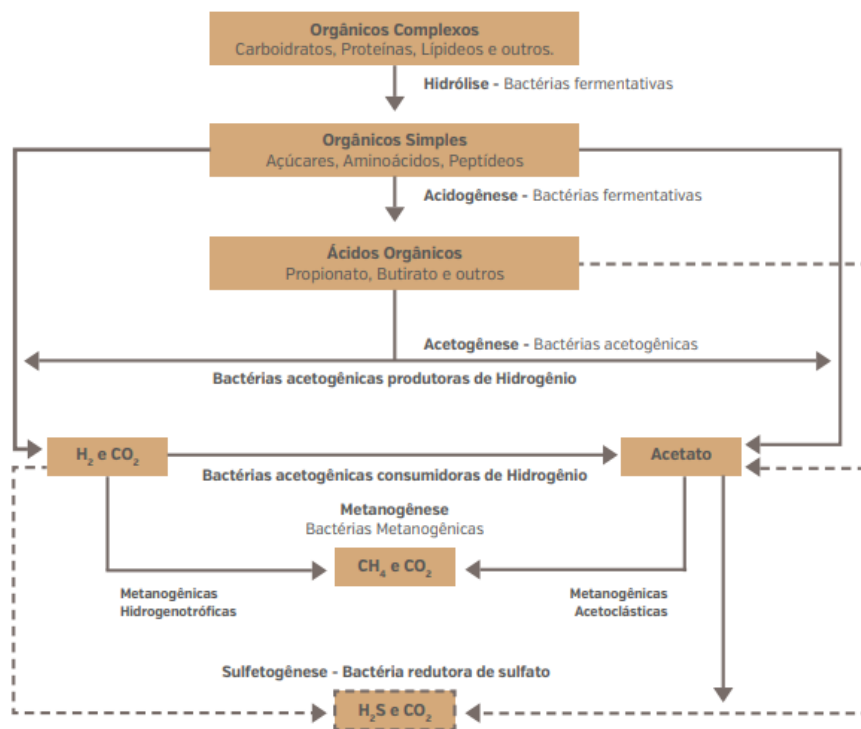
resultado do processo inclui biogás (metano e CO_2), água, compostos nitrogenados, sulfetos e lodo residual (Probiogás, 2015).

Uma etapa adicional, a sulfetogênese, pode ocorrer na presença de compostos contendo enxofre, como sulfatos. Nesse caso, microrganismos redutores de sulfato competem com as arqueias metanogênicas pelos mesmos substratos, o que pode reduzir a eficiência da metanogênese e resultar na geração de sulfeto de hidrogênio (H_2S) — um gás tóxico e corrosivo que impõe exigências adicionais de tratamento (Probiogás, 2015).

Três grupos microbianos são essenciais nesse processo: (i) bactérias fermentativas, responsáveis pela acidogênese; (ii) bactérias acetogênicas, que atuam na conversão de ácidos graxos em acetato e hidrogênio; e (iii) arqueias metanogênicas, especializadas na produção de metano. Também podem estar presentes microrganismos redutores de enxofre, com participação variável dependendo da composição do substrato. Cada grupo possui papéis específicos e interdependentes, funcionando como elos de uma cadeia metabólica coordenada.

A Figura 5 apresenta uma representação esquemática desse processo, destacando as interações entre os diferentes grupos microbianos envolvidos na geração do biogás.

Figura 5 - Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia



Fonte: Guia Técnico – Probiogás, 2016. *apud* Chernicharo, 2007

A digestão anaeróbia inicia-se com a hidrólise, etapa em que compostos orgânicos complexos, como proteínas, lipídios e carboidratos e são convertidos em unidades mais simples e solúveis. Isso ocorre

por meio da ação de enzimas extracelulares produzidas por bactérias hidrolíticas: os carboidratos tornam-se açúcares simples, as proteínas são reduzidas a aminoácidos, e os lipídios a ácidos graxos, após sofrerem emulsificação.

Em seguida, os produtos da hidrólise passam por acidogênese, processo também conduzido por bactérias fermentativas. Nessa fase, os compostos simples são transformados em substâncias menores, como ácidos orgânicos voláteis (ex: ácido acético e propiônico), etanol, gás hidrogênio (H_2) e dióxido de carbono (CO_2). Por iniciarem a cadeia de reações, essas bactérias aproveitam melhor a energia disponível nos substratos, obtendo maior rendimento metabólico em comparação aos microrganismos das etapas seguintes.

A acidificação do esgoto pode ter início ainda durante seu transporte, especialmente em trechos da rede coletora onde ocorre estagnação de resíduos orgânicos sob condições anaeróbias.

Além disso, o aumento da temperatura acelera todas as reações biológicas envolvidas nesse processo.

Em sistemas com presença significativa de compostos contendo enxofre, ocorre também a sulfetogênese. Nessa etapa, microrganismos sulforedutores, incluindo tanto bactérias quanto arqueias, utilizam sais como sulfato (SO_4^{2-}) ou sulfito (SO_3^{2-}) como aceptores finais de elétrons, oxidando substratos orgânicos como etanol, acetato e glicerol. O principal subproduto dessa atividade é o sulfeto de hidrogênio (H_2S), que frequentemente vem acompanhado de CO_2 .

A presença de H_2S , além de gerar odores desagradáveis e apresentar toxicidade, compromete a eficiência da digestão anaeróbia, pois compete com as arqueias metanogênicas pelos mesmos substratos e pode inibir sua atividade, reduzindo a produção de metano (Associação Brasileira do Biogás, 2025).

3.3.2 Considerações sobre a produção e segurança do biogás

A estimativa do potencial de produção de biogás depende, em primeiro lugar, do conhecimento detalhado do resíduo orgânico disponível: sua composição (qualidade), volume e frequência de geração (quantidade). A partir dessas informações, pode-se realizar o dimensionamento técnico do sistema, escolher a tecnologia mais apropriada e analisar a viabilidade econômica do projeto, considerando diferentes formas de valorização do biogás (Associação Brasileira do Biogás, 2025).

De acordo com Chernicharo (2007), instalações de tratamento de esgoto podem gerar odores desagradáveis devido às condições operacionais e aos processos anaeróbios adotados.

Isso reforça a necessidade de estratégias eficazes para o controle das emissões odorantes, tanto por meio de ações preventivas quanto por tecnologias de tratamento dos gases emitidos.

Outro aspecto crítico é a corrosão, frequentemente associada ao H_2S gerado nos processos

anaeróbios. Esse gás, além de tóxico e corrosivo, é inflamável e representa um risco à segurança.

Por isso, o biogás deve ser coletado de forma controlada, medido e, preferencialmente, aproveitado energeticamente ou, caso isso não seja possível, queimado adequadamente para evitar sua liberação na atmosfera. O metano (CH_4), principal componente energético do biogás, tem um potencial de aquecimento global aproximadamente 21 vezes superior ao do dióxido de carbono, o que evidencia a importância de sua contenção e uso apropriado. A operação segura de sistemas anaeróbios exige a adoção de medidas preventivas, como sinalização adequada nas áreas próximas aos reatores, proibindo atividades que envolvam chamas ou faíscas.

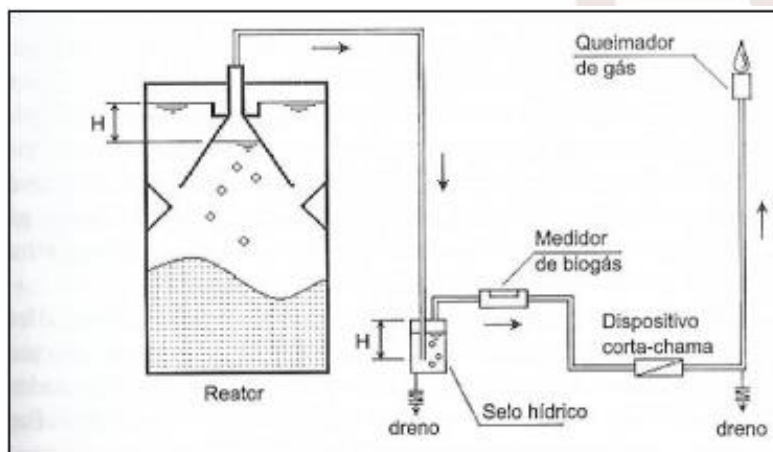
3.3.3 Dispositivos de segurança para sistemas de biogás

Nos reatores anaeróbios de médio e grande porte, a produção de biogás ocorre em volumes relevantes, o que torna indispensável a adoção de dispositivos que assegurem a operação segura do sistema de coleta, transporte e aproveitamento do gás. Segundo Chernicharo (2007), os principais componentes recomendados são:

- Válvula corta-chama, para evitar retrocesso de chamas na tubulação;
- Manômetro, para monitoramento da pressão da linha de gases;
- Válvula de alívio de pressão e vácuo, garantindo estabilidade no sistema;
- Tanque de pressurização e sedimentação, para remoção de umidade e partículas;
- Medidor de vazão, essencial para avaliar a eficiência da produção de biogás;
- Queimador de gases, para destinação segura do excedente não aproveitado;
- Pontos de purga de umidade, especialmente nos pontos baixos da tubulação;
- Tubulação resistente à corrosão, dimensionada para uma velocidade de até 4 m/s com base na vazão média do gás.

A figura 6, representa um modelo de um sistema para reatores UASB.

Figura 6 – Diagrama de um sistema de gases para reatores UASB de pequeno porte



Fonte – Chernicharo, 2007.

3.3.4 O biogás como fonte energética sustentável no saneamento básico

O tratamento de esgoto por meio de processos anaeróbios, além de promover a estabilização da matéria orgânica, resulta na formação de biogás — uma mistura gasosa composta principalmente por metano (CH_4). Conforme destacado pela Associação Brasileira do Biogás (ABiogás, 2021), o metano é um potente gás de efeito estufa (GEE), com potencial de aquecimento global (GWP) aproximadamente 28 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2).

No entanto, essa característica é acompanhada de um relevante potencial energético, que pode ser explorado de forma estratégica para a geração de energia renovável e, simultaneamente, para a mitigação dos impactos ambientais relacionados às mudanças climáticas.

A energia química armazenada no biogás pode ser convertida em eletricidade, calor, energia mecânica ou até mesmo em biocombustível.

Apesar de não ser abordado de forma explícita no Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab), o biogás já é amplamente reconhecido como uma solução eficiente e sustentável, principalmente no contexto do tratamento de esgoto sanitário.

Ao incorporar o aproveitamento do biogás nos sistemas de saneamento, diversos benefícios podem ser alcançados.

Entre os principais, destacam-se: a redução das emissões de gases de efeito estufa e de partículas atmosféricas; a minimização dos maus odores geralmente associados aos processos anaeróbios; a elevação da sustentabilidade operacional, ambiental e financeira das Estações de Tratamento de Esgoto (ETE); e a possibilidade de transformar um passivo ambiental em um ativo energético valioso, com uso descentralizado e adaptável à realidade local.

Além disso, a utilização do biogás contribui para a melhoria dos serviços prestados no setor de saneamento, favorece a criação de modelos baseados em economia circular e fortalece a saúde pública por meio da redução de impactos ambientais diretos.

Outro aspecto relevante é a escalabilidade da tecnologia, que permite sua aplicação em diferentes portes de sistemas, desde pequenas comunidades até grandes centros urbanos.

A cadeia de valor associada ao biogás também impulsiona o desenvolvimento regional, com estímulo à geração de empregos e à consolidação de fornecedores especializados.

Esses fatores ainda tornam os projetos mais atrativos para linhas de financiamento e crédito voltadas à transição energética e à infraestrutura sustentável.

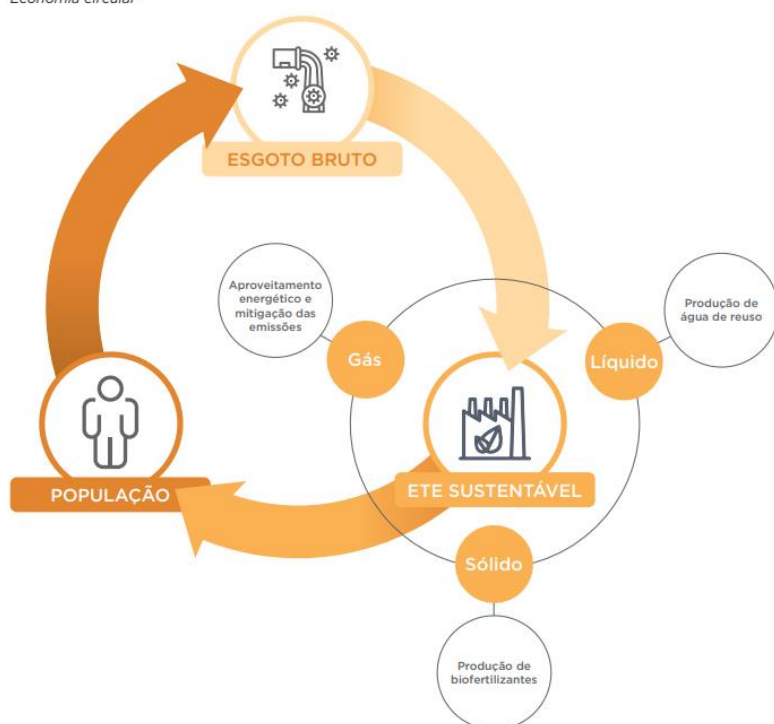
Portanto, o biogás surge como uma ferramenta estratégica na busca pela universalização do acesso ao saneamento básico, ao mesmo tempo em que contribui com a agenda energética e climática do país.

A adoção de tecnologias que integram o tratamento eficiente de resíduos com a produção de energia limpa representa um caminho viável, inovador e necessário para alcançar metas ambientais, econômicas e sociais de longo prazo.

A figura 7, representa um esboço do ciclo sustentável, com as relações entre a população, esgoto bruto, as estações de tratamento de esgoto sustentáveis – produção de água de reus, aproveitamento energético e mitigação das emissões de gás, e a produção de biofertilizantes, demonstrando a sua importância no processo do do ciclo sustentável do biogás.

Figura 7 – Ciclo sustentável do biogás

Ciclo Sustentável do Biogás
Economia circular



Fonte: Adaptação pelo Autor - A Biogás, 2021

3.3.5 Potencial energético do biogás no saneamento brasileiro

O adequado tratamento e coleta de esgoto sanitário permanecem como pontos centrais nas discussões sobre saúde pública e sustentabilidade no Brasil.

Desde a implementação do Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab) em 2013, o governo federal tem direcionado esforços para garantir a universalização desses serviços essenciais.

Contudo, diversos desafios técnicos, estruturais e financeiros ainda comprometem o cumprimento dessas metas.

Nesse cenário, o biogás, que é o subproduto da digestão anaeróbia de esgotos, representa uma alternativa estratégica, tanto pelo seu valor energético quanto pela sua capacidade de contribuir na

mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEEs).

De acordo com a Associação Brasileira do Biogás (ABiogás, 2021), o país possui elevado potencial de produção de biogás proveniente do setor de saneamento.

Essa estimativa se baseia em dados do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), referentes ao ano de 2019, e considera os cenários de expansão propostos pelo Plansab.

Em uma projeção otimista, o volume de biogás gerado pode aumentar mais de 85% até 2033.

Para o ano de 2023, por exemplo, a estimativa de produção variava entre 513 e 674 milhões de metros cúbicos normais (Nm³), dependendo do nível de adoção de tecnologias anaeróbias. Até 2033, o volume pode atingir entre 682 e 926 milhões de Nm³ por ano, reforçando o papel estratégico desse recurso renovável.

Nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), existem duas rotas tecnológicas principais para geração de biogás, conforme apresentado no relatório do Programa de Energia para o Brasil (BEP, 2021). A primeira ocorre a partir da digestão anaeróbia do lodo oriundo de sistemas de lodos ativados.

Já a segunda, e mais diretamente relacionada à geração de biogás, é o uso de reatores anaeróbios de fluxo ascendente com manto de lodo (UASB), onde o gás é gerado de forma integrada ao processo de tratamento.

No caso dos sistemas convencionais, o biogás só é obtido se houver digestão do lodo, o que ainda é raro em muitos municípios devido ao alto custo da operação. Como consequência, o lodo tratado é frequentemente encaminhado para aterros ou compostagem, desperdiçando seu potencial energético.

Em 2019, cerca de 108 milhões de brasileiros eram atendidos por serviços de coleta e tratamento de esgoto (SNIS, 2019). Esse volume permitiria uma produção anual de aproximadamente 502 milhões de Nm³ de biogás, distribuída entre cerca de 1.800 unidades de tratamento.

A análise regional, apresentada pela ABiogás (2021), mostra uma concentração significativa na região Sudeste, que responde por cerca de 71% do total estimado, sendo o estado de São Paulo responsável por 43% desse valor.

Os estados do Rio de Janeiro e Minas Gerais também se destacam, tanto pela densidade populacional quanto pelo número de ETE com tecnologias apropriadas para geração de biogás.

Esses números evidenciam uma oportunidade concreta para o avanço do aproveitamento energético do biogás no setor de saneamento.

Com políticas públicas eficazes, financiamento estruturado e maior difusão de tecnologias consolidadas, é possível transformar o esgoto tratado em uma solução conjunta para os desafios ambientais e energéticos.

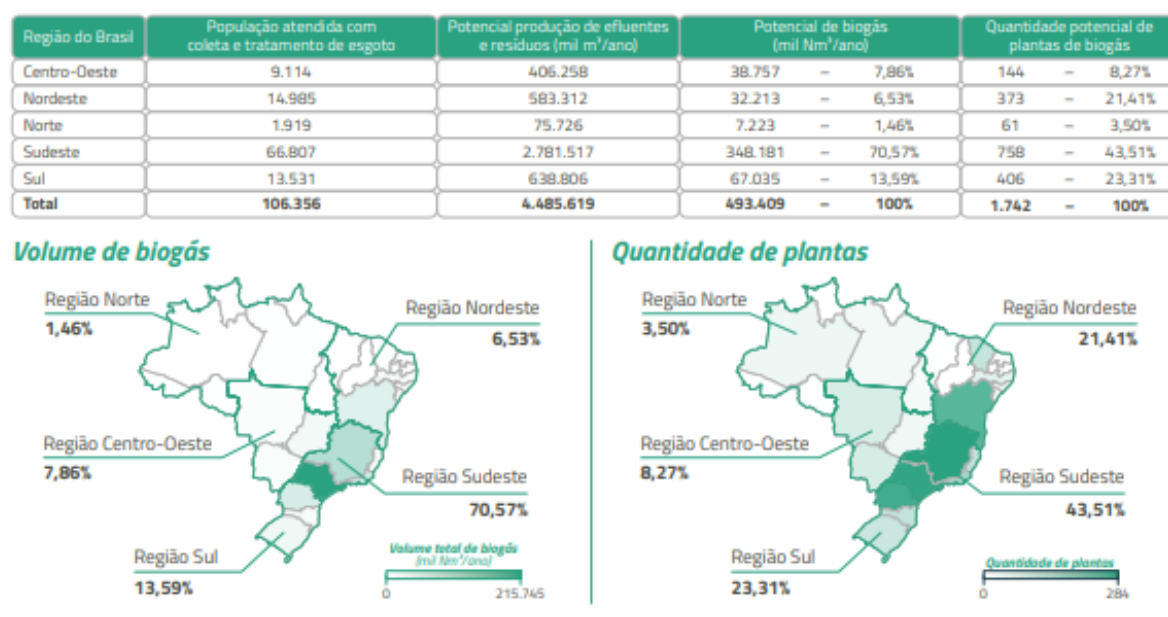
Essa abordagem favorece a sustentabilidade, amplia a eficiência no setor e agrega valor ao

saneamento como política pública.

A Figura 8 apresenta o panorama do potencial de produção de biogás em curto prazo nas ETE brasileiras.

O gráfico evidencia a distribuição regional da produção, os volumes projetados, a quantidade de plantas de tratamento, a população beneficiada com coleta e tratamento, além do potencial energético e da capacidade instalada para geração de biogás a partir dos resíduos e efluentes gerados.

Figura 8 - Potencial de biogás a curto prazo de Estações de Tratamento de Esgotos no Brasil



Fonte: Adaptado pelo autor – BEP, 2021

3.3.6 Projeções energéticas do biogás a partir do tratamento de esgoto na região sudeste até 2033

A região Sudeste lidera o país em termos de cobertura de coleta e tratamento de esgoto, apresentando, já em 2017, um índice de 93,4%; o mais alto entre todas as regiões brasileiras. Essa infraestrutura consolidada, com ampla abrangência nos centros urbanos e parte das áreas rurais, cria um ambiente altamente favorável para o aproveitamento energético do biogás no setor de saneamento.

De acordo com estimativas da Associação Brasileira do Biogás (ABiogás, 2021), a produção regional de biogás alcançou cerca de 357,2 milhões de metros cúbicos em 2023. Projeções para 2033 indicam um crescimento significativo, com volumes situando-se entre 420,6 e 442,9 milhões de Nm³ por ano, dependendo do nível de implantação de tecnologias anaeróbias nos sistemas de tratamento de esgoto.

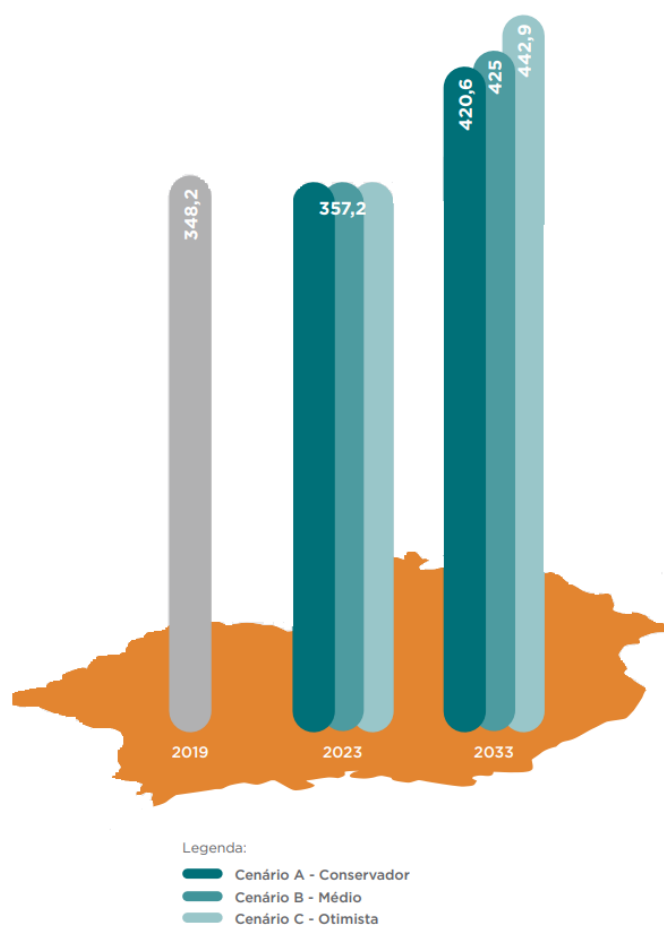
Esses volumes representam um considerável potencial energético. Em 2023, o biogás gerado na região poderia ser convertido em cerca de 854 mil MWh de energia elétrica, ou 976 mil MWh de energia térmica, ou ainda substituir aproximadamente 251,7 milhões de litros de diesel. Para o ano de 2033, as

projeções indicam que esse potencial pode ultrapassar 1 milhão de MWh em geração elétrica, 1,2 milhão de MWh de energia térmica ou substituir mais de 312 milhões de litros de diesel.

Esses dados consolidam o papel estratégico do biogás como fonte complementar e renovável na matriz energética regional, o mesmo tempo em que contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e o avanço de uma economia de baixo carbono no setor de saneamento.

A Figura 9 ilustra o potencial de produção de biogás nos diferentes cenários projetados para a região Sudeste.

Figura 9 - Potencial de produção de biogás dos cenários analisados para a região Sudeste.



Fonte – Abiogás, 2021

3.3.7 Purificação e aproveitamento energético do biogás: Tecnologias, normas e potencial no Brasil

O biogás, resultante da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, especialmente em estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários, representa uma fonte promissora de energia renovável. Composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), ele também contém impurezas como sulfeto de hidrogênio (H_2S), vapor d'água, partículas sólidas e traços de compostos orgânicos

voláteis (CIBiogás, 2025).

Para que esse gás possa ser utilizado de forma segura e eficiente, é fundamental que passe por um processo de purificação, adequado às exigências do uso final. A purificação do biogás visa remover impurezas que podem comprometer a integridade de motores, caldeiras, tubulações e equipamentos de geração de energia.

O biogás, proveniente da digestão anaeróbia de resíduos orgânicos, é gerado principalmente em estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários.

Ele é composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), mas também contém impurezas como sulfeto de hidrogênio (H_2S), vapor d'água, partículas sólidas e compostos orgânicos voláteis (CIBiogás, 2025).

Para o aproveitamento seguro e eficiente do biogás, é necessário submetê-lo a processos de purificação, especialmente para uso em geração de energia ou substituição de combustíveis fósseis.

A remoção do H_2S é crucial para garantir a durabilidade dos equipamentos, como motores, caldeiras e tubulações.

Além disso, o teor de H_2S no biogás é regulado pela Resolução ANP nº 886/2022, que estabelece um limite máximo de 10 mg/ Nm^3 para biometano de estações de esgoto, visando a segurança no uso veicular e industrial (ANP, 2022).

A dessulfurização do biogás pode ser realizada por métodos físicos, químicos ou biológicos.

Destacam-se a lavagem com água, absorção com carvão ativado, e o uso de soluções de Fe/EDTA.

Além disso, a secagem do biogás é fundamental, pois a água presente pode favorecer reações de corrosão e reduzir a eficiência dos sistemas de conversão.

As tecnologias mais comuns para secagem incluem condensação e adsorção com sílica gel ou carvão ativado.

Quando o objetivo é produzir biometano, a remoção do CO_2 é necessária, sendo realizada por processos como separação por membranas ou PSA (Pressure Swing Adsorption).

No Brasil, a qualidade do biometano é regulada pela Resolução ANP nº 886/2022, que define os parâmetros técnicos para seu uso como combustível veicular ou em instalações residenciais e industriais.

O biogás purificado pode ser convertido em diversas formas de energia, como eletricidade, calor e biocombustíveis, com a co-geração de energia elétrica e térmica também sendo uma opção viável.

Além disso, ele pode ser utilizado em processos industriais para substituir fontes de energia convencionais, promovendo uma maior eficiência energética.

O biometano resultante do refino pode ser injetado na rede de gás natural ou usado como combustível veicular, incluindo transporte por gasoduto virtual ou na forma liquefeita (Bio-GNL),

ampliando a possibilidade de mobilidade sustentável e contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa.

Em resumo, a purificação e o uso eficiente do biogás representam uma oportunidade concreta para promover a valorização de resíduos, a geração descentralizada de energia, a substituição de combustíveis fósseis e o avanço rumo a uma economia de baixo carbono.

Para viabilizar esse aproveitamento, é fundamental o domínio das tecnologias de purificação e conversão, a conformidade com as normas de qualidade e a criação de modelos econômicos sustentáveis e adaptados às diferentes realidades regionais.

A Figura 10 ilustra o percurso do biogás desde sua produção até as diversas formas de utilização, evidenciando seu papel estratégico na transição energética e no fortalecimento da economia circular.

Figura 10 – Escolha da aplicação do biogás



Fonte: Abiogás, 2025

3.3.8 O papel do biogás na implementação dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

O biogás representa uma solução estratégica para o cumprimento de diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos na Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, reafirmada pelo Brasil nas conferências climáticas COP21 e COP26. Conforme destaca a Soares (2022), o aproveitamento energético de resíduos orgânicos, por meio da digestão anaeróbia, contribui simultaneamente para a proteção ambiental, a inclusão social e o desenvolvimento econômico.

Em relação a ODS 3 – Saúde e bem-estar, a implantação do sistema vai capturar o biogás que, de outra forma, seria liberado na atmosfera. Ao fazer isso, você reduz os odores e a emissão de gases poluentes que podem causar problemas respiratórios e outros riscos à saúde pública na área de Barra Mansa.

Pode-se afirmar que a ODS 6 – Água potável e saneamento, é contemplada no projeto complementa o saneamento já existente na cidade. Ao dar um uso nobre para o biogás, você está valorizando todo o processo de tratamento de esgoto. É um passo extra para garantir uma gestão de resíduos mais completa e sustentável.

No contexto do ODS 7 - Energia acessível e limpa, o biogás se torna uma fonte de energia renovável, limpa e gerada localmente. A implantação do sistema contribui para a matriz energética da cidade, diminuindo a dependência de combustíveis fósseis e promovendo a transição para um futuro energético mais sustentável.

Quanto ao ODS 8 - Trabalho decente e crescimento econômico, a cadeia produtiva do biogás impulsiona a economia verde e gera empregos qualificados, desde a fabricação e instalação até a operação e manutenção dos sistemas.

O ODS 11 - Cidades e comunidades sustentáveis - contempla a implantação do sistema que transforma um resíduo urbano (o biogás) em um recurso valioso. Ao produzir energia na própria estação de tratamento de esgoto, a cidade se torna mais autossuficiente e mais limpa, reduzindo sua pegada de carbono e se tornando um modelo de desenvolvimento urbano sustentável.

ODS 12 – Consumo e produção responsáveis – Este projeto é um exemplo perfeito de economia circular. Ele pega um resíduo (o biogás) e o transforma em energia, um recurso valioso. Isso demonstra como é possível criar um sistema onde o "lixo" é utilizado como matéria-prima, incentivando o uso inteligente dos recursos e o consumo responsável.

Dessa forma, conforme reforça a Soares (2022), o biogás integra os princípios da economia circular ao transformar passivos ambientais em ativos energéticos e agrícolas, consolidando-se como um instrumento eficaz para o avanço dos ODS no Brasil.

Figura 11 – Objetivos do desenvolvimento sustentáveis



Fonte: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>, data 07,2025

3.4 Geração de energia elétrica a partir do biogás: Aplicações, armazenamento e diretrizes técnicas

A produção de energia elétrica a partir do biogás é consistentemente amparada por publicações técnicas especializadas.

Além de ser utilizado como combustível em veículos, indústrias e sistemas residenciais, o biogás também pode ser aplicado para secar lodos e escumas em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), bem como para gerar eletricidade diretamente.

Conforme descrito no Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto (PROBIOGÁS, 2015), a viabilidade do biogás em ETE brasileiras demanda um planejamento abrangente — desde a concepção do projeto até a seleção adequada de tecnologias e equipamentos. O guia aborda os métodos mais utilizados na conversão energética do biogás, as características específicas do biogás gerado em sistemas anaeróbios, bem como os potenciais de aplicação desse recurso nas diferentes realidades operacionais.

Um dos fatores fundamentais para viabilizar o aproveitamento energético do biogás é o seu armazenamento, que se torna imprescindível quando se busca geração de energia ou uso futuro do gás.

A adoção de gasômetros depende da escala da planta e da finalidade do uso: caso o biogás seja apenas queimado como medida de segurança, o armazenamento pode ser dispensado. Por outro lado, quando há intenção de aproveitamento energético, torna-se necessária a implementação de sistemas de estocagem.

As formas de armazenamento diferem conforme a pressão operacional:

- Atmosférico (0 a 0,1 kPa): requer sopradores para movimentação do gás;
- Baixa pressão (1 a 5 kPa): indicada para unidades de pequeno e médio porte, usando gasômetros infláveis;
- Alta pressão (0,1 a 1 MPa): voltada para sistemas maiores que necessitam maior densidade de energia;
- Pressões superiores a 1 MPa: aplicáveis principalmente ao uso do biogás como combustível veicular, otimizando o armazenamento em menor volume.

As estruturas utilizadas vão desde balões de lona e colchões infláveis (para baixa pressão), até tanques metálicos com membranas ou sistemas com lastro hidráulico.

A seleção do sistema mais adequado depende da demanda energética da planta, da topografia do local e da forma de utilização do gás.

Além disso, o dimensionamento precisa considerar as especificações técnicas dos equipamentos de conversão, como motores e turbinas, bem como sua eficiência térmica e regime de operação (PROBIOGÁS, 2015).

Do ponto de vista termodinâmico, as tecnologias termelétricas são classificadas com base nos ciclos de potência que regem a transformação da energia térmica em mecânica.

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018), cada ciclo estabelece a sequência de processos físicos e químicos que orientam a escolha tecnológica mais apropriada.

Os ciclos mais utilizados são:

- Ciclo Brayton: aplicado em turbinas a gás industriais e aeroderivadas;
- Ciclo Rankine: comum em sistemas com geração de vapor;
- Ciclo Otto: utilizado em motores com ignição por centelha, como os de ciclo gasolina;
- Ciclo Diesel: empregado em motores com ignição por compressão, amplamente usados em grupos geradores.

Cada tecnologia apresenta particularidades quanto ao tipo de combustível, eficiência energética e aplicação, permitindo uma ampla gama de soluções energéticas de acordo com o contexto da instalação (EPE, 2018).

3.4.1 Turbinas a Gás

As turbinas a gás funcionam com base no ciclo termodinâmico de Brayton, que envolve três componentes principais: o compressor, a câmara de combustão e a turbina de expansão (Cabral, 2019). Nesse ciclo, o ar atmosférico é inicialmente comprimido, aumentando sua pressão e temperatura. Em seguida, é conduzido à câmara de combustão, onde se mistura com o combustível e ocorre uma reação exotérmica, elevando ainda mais a temperatura dos gases. Esses gases quentes e sob alta pressão são direcionados à turbina, que extrai a energia mecânica do fluxo gasoso para movimentar o próprio compressor e um gerador elétrico acoplado. De acordo com Cabral (2019), as turbinas comerciais variam em potência, podendo atender desde pequenas demandas, com algumas centenas de quilowatts, até grandes instalações, com capacidades próximas a 300 megawatts.

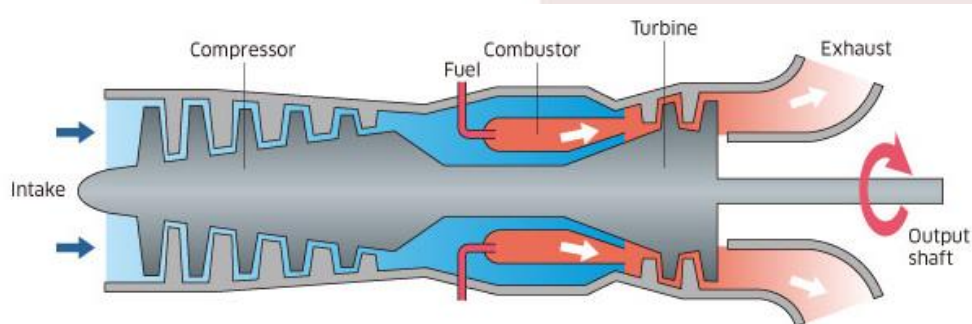
Segundo Bicalho e Almeida (2018), a expansão do uso de turbinas a gás no setor elétrico reflete mudanças importantes nas tecnologias de geração. Para que essas turbinas possam operar como unidades de geração contínua (de base), ajustes significativos nas condições operacionais são necessários. Esses ajustes vão além de simples reconfigurações técnicas, inserindo-se em um processo mais amplo de modernização da matriz energética, o qual envolve desafios técnicos interconectados.

Entre os principais desafios identificados pelos autores, incluem-se:

- **Eficiência:** A constante necessidade de ampliar o rendimento energético, especialmente em um cenário competitivo;
- **Flexibilidade:** A capacidade de operar com diferentes combustíveis, ampliando a adaptabilidade operacional e ambiental;
- **Desempenho ambiental:** O desenvolvimento de sistemas de combustão que reduzam emissões e atendam às normas ambientais mais exigentes;
- **Confiabilidade e disponibilidade:** A garantia de desempenho estável em condições adversas e sob uso contínuo;
- **Miniaturização eficiente:** O avanço de tecnologias compactas que permitam aplicações descentralizadas com custos acessíveis.

Conforme Bicalho e Almeida (2018), esses fatores exigem um equilíbrio cuidadoso entre metas técnicas, pois avanços em uma área podem impor restrições em outras. Dessa forma, a evolução tecnológica das turbinas a gás depende de soluções integradas, capazes de lidar com um cenário energético em transformação. Considerando sua eficiência e versatilidade, essas turbinas continuam a ocupar papel central na matriz elétrica contemporânea. A Figura 12 ilustra uma turbina a gás empregada na produção de eletricidade.

Figura 12 - Turbina a Gás



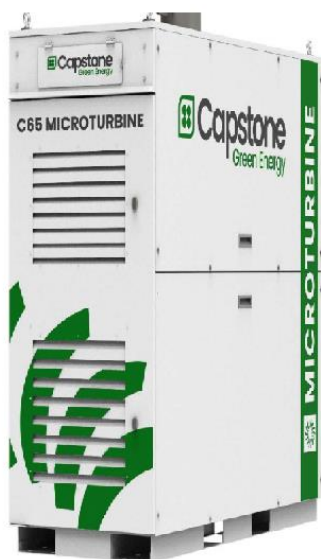
Fonte – Adaptado pelo Autor - https://global.kawasaki.com/br/energy/equipment/gas_turbines/outline.html/2025

3.4.2 Microturbinas a Gás

As microturbinas são dispositivos capazes de gerar energia elétrica a partir do biogás, operando com base nos mesmos princípios das turbinas a gás convencionais. Elas são comercializadas com faixas de potência que geralmente variam entre 30 e 1.000 kW, sendo aplicáveis em diferentes escalas de geração. Seu funcionamento está fundamentado no ciclo termodinâmico de Brayton, o qual envolve três componentes principais: um compressor, uma câmara de combustão e uma turbina de expansão. O biogás é comprimido, queimado, e os gases resultantes fazem a turbina girar. Essa energia mecânica gerada é então transformada em eletricidade ao ser transferida para um gerador acoplado ao eixo da turbina..

A Figura 13, mostra uma microturbina, utilizada para geração de energia elétrica.

Figura 13 – Microturbina a Gás.



Fonte: adaptada pelo autor <https://fluxo.si/produto/micro-turbinas-para-geracao-eletrica-e-cogerao/2025>

Segundo a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (2020), as microturbinas operam em rotações elevadas e aproveitam o calor dos gases de exaustão para realizar o pré-aquecimento do ar admitido na combustão.

Essa característica contribui significativamente para o aumento da eficiência energética do sistema.

Outro fator vantajoso é a disponibilidade desses equipamentos em modelos de menor porte, o que proporciona maior adaptabilidade e permite sua aplicação em unidades de geração de energia de pequena escala.

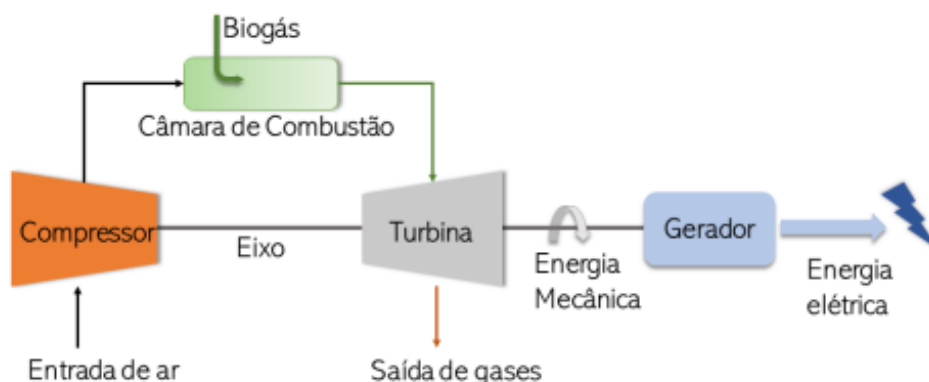
Apesar de apresentarem benefícios como elevada eficiência, baixa demanda por manutenção e operação com reduzido impacto ambiental, essa tecnologia ainda não está amplamente disseminada no Brasil.

A principal barreira é o investimento inicial elevado, tanto para implantação quanto para operação.

Em função disso, muitos empreendimentos acabam optando por motogeradores, que, embora apresentem menor eficiência, oferecem custos mais acessíveis e maior viabilidade econômica, especialmente dentro da realidade das plantas brasileiras de biogás.

A Figura 14 expressa um esquema sobre os principais elementos que compõem sistemas de geração de energia elétrica utilizando microturbinas a biogás.

Figura 14 - Sistema de geração de energia elétrica com microturbinas a biogás.



Fonte: Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (2020)

3.4.3 Motor de combustão interna – Ciclo Otto

Os motores de combustão interna transformam a energia química do combustível em energia mecânica por meio da combustão da mistura ar-combustível.

Entre eles, os que operam com o ciclo Otto são amplamente utilizados com biogás, devido à ignição por faísca, que proporciona maior eficiência elétrica e menor custo em comparação a outras tecnologias. Para operar com biogás, esses motores exigem ajustes nos sistemas de alimentação, ignição e compressão. No Brasil, há oferta limitada de modelos de grande porte, geralmente com potências de até 230 kW, o que frequentemente exige a importação de equipamentos mais potentes.

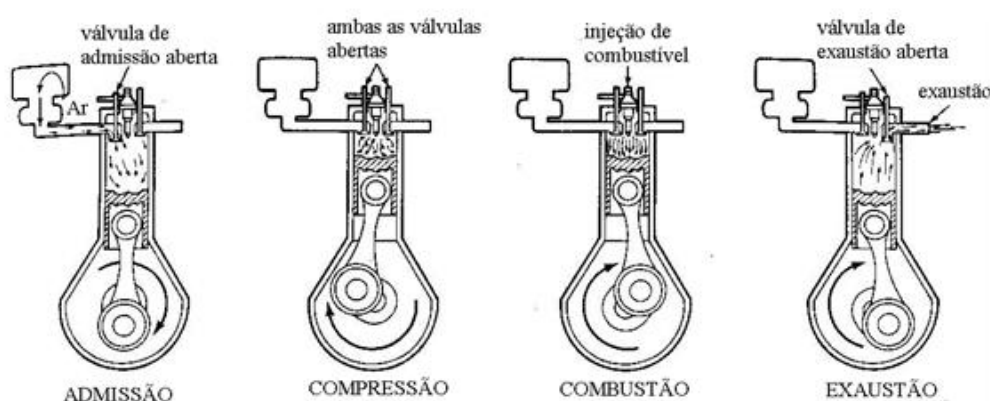
Conforme o ICLEI (2010), a eficiência média desses motores gira em torno de 28%, com geração elétrica realizada por um gerador acoplado diretamente ao motor.

Segundo Oliveira (2013), os motores que operam com o ciclo Otto são os mais adequados para o uso com gases combustíveis. Seu funcionamento é baseado em processos termodinâmicos de compressão e expansão adiabáticas, além de aquecimento e resfriamento a volume constante. Durante o ciclo, a válvula de admissão se abre em tempo controlado para permitir a entrada do ar, que se mistura com o combustível no interior do cilindro. A combustão ocorre a partir de uma centelha gerada pela vela de ignição, iniciando uma explosão que impulsiona o pistão em movimento alternado. Esse movimento linear é transformado em rotação por meio do virabrequim, gerando força no eixo de saída.

Nos motores diesel adaptados para operar com biogás, é necessária a presença de uma pequena fração de diesel (entre 3% e 5%) para garantir a ignição, caracterizando os sistemas do tipo “*bi-fuel*” ou “*dual-fuel*”. Tanto os motores Otto quanto os diesel adaptados demandam compressores para aumentar a pressão do biogás antes de sua injeção na câmara de combustão.

Os motores ciclo Otto admitem uma mistura homogênea de ar e combustível ainda na etapa anterior à compressão. A ignição ocorre por faísca, com a mistura podendo ser introduzida por meio da válvula de admissão ou diretamente na corrente de ar. Esse sistema é típico de veículos movidos a gasolina, etanol, gás natural ou metanol. O funcionamento do motor Otto segue os fundamentos da termodinâmica e é composto por quatro etapas principais, razão pela qual é conhecido como motor de “quatro tempos”. A Figura 15 apresenta uma representação esquemática do funcionamento de um motor ciclo Otto de quatro tempos.

Figura 15 – Ciclo de quatro tempos



Fonte: Adaptado pelo autor de ALUGA GERA (2025)

- Primeiro tempo – Admissão: O ciclo inicia-se com o movimento descendente do pistão, que gera vácuo e permite a entrada da mistura de ar e combustível no interior do cilindro através da válvula de admissão.
- Segundo tempo – Compressão: Em seguida, o pistão sobe, comprimindo essa mistura dentro da câmara de combustão. Essa compressão eleva a temperatura e a pressão, preparando a mistura para a ignição.
- Terceiro tempo – Combustão (ou explosão): Com a mistura totalmente comprimida, uma centelha emitida pela vela de ignição provoca a combustão. A rápida expansão dos gases resultantes força o pistão a descer, gerando energia mecânica que será convertida em trabalho.
- Quarto tempo – Escape: Na etapa final, o pistão sobe novamente, abrindo a válvula de escape para liberar os gases da combustão para fora do cilindro, concluindo o ciclo e reiniciando o processo.

Os motores de combustão interna (MCI), quando integrados a geradores, formam uma das principais alternativas tecnológicas para geração de eletricidade a partir do biogás. A Figura 16 apresenta um conjunto moto - gerador, no qual o motor fornece energia mecânica que é transformada em energia elétrica por meio de um alternador.

Figura 16 – Moto- gerador



Fonte: Adaptado pelo autor de STEMATIC (2025)

De acordo com a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (2020), os grupos motogeradores que utilizam biogás operam com motores de combustão interna (MCI) acoplados a alternadores, convertendo a energia térmica liberada pela queima do biogás em trabalho mecânico e, consequentemente, em energia elétrica.

Esses motores funcionam com o ciclo Otto, em que a combustão da mistura de ar e combustível é iniciada por uma faísca gerada pela vela de ignição. A expansão dos gases resultantes da combustão empurra o pistão para baixo, gerando movimento mecânico, que é convertido em eletricidade.

A adaptação de motores projetados para o ciclo Diesel para o ciclo Otto, conhecida como *ottorização*, envolve modificações técnicas específicas.

Tais ajustes incluem a regulação do carburador, a adequação do sistema de alimentação e ignição, além de ajustes na taxa de compressão.

Essas mudanças são necessárias para otimizar o uso do biogás, que possui características diferentes dos combustíveis tradicionais utilizados em motores a diesel.

Segundo Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (2020), o mercado oferece uma ampla gama de grupos motogeradores com potências que variam de 10 a 1.400 kW, incluindo tanto equipamentos nacionais quanto importados.

Embora requeiram mais manutenção que as microturbinas, esses sistemas apresentam custos iniciais mais baixos e são capazes de operar de forma eficiente e estável.

Sua maior capacidade de recuperação de calor gerado durante a operação também contribui para sua viabilidade em diferentes cenários de geração de eletricidade.

Além disso, a adaptação de sistemas de motogeradores a biogás pode ser uma solução eficaz, especialmente em locais onde há uma disponibilidade constante desse combustível renovável.

A WEG (2020) descreve os diferentes regimes de serviço dos geradores, os quais determinam a forma como os geradores são utilizados ao longo do tempo, impactando diretamente seu dimensionamento e sua aplicação.

O Regime Contínuo (COP), por exemplo, permite que os geradores operem de forma ininterrupta, fornecendo energia constante à carga nominal, sem limite de horas de operação.

Já o Regime Prime (LTP) permite que o gerador opere com carga constante por até 500 horas anuais, sendo mais adequado para situações em que o fornecimento de energia precisa ser temporariamente interrompido.

O Regime Prime Variável (PRP) permite operação contínua, mas com limitações quanto a sobrecargas e médias de potência.

O Modo Stand-by (ESP), por sua vez, é utilizado apenas em situações emergenciais, quando o gerador entra em operação como reserva da fonte principal de energia, com limite de horas de operação e uso não contínuo.

3.5 Mercado de Energia Elétrica

O sistema elétrico brasileiro está em processo de modernização para se adaptar às transformações do cenário energético atual.

Em 2019, o Ministério de Minas e Energia (MME) criou um Grupo de Trabalho com o objetivo de propor mudanças que reestruturem o setor, atendendo às novas demandas tecnológicas, regulatórias e de mercado.

Entre os principais pontos discutidos estão: a melhoria do ambiente de mercado, a expansão da infraestrutura elétrica, a formação de preços mais eficientes, a alocação adequada de custos e riscos, a sustentabilidade econômica dos serviços de distribuição, a inserção de novas tecnologias, a separação entre lastro e energia, e a modernização dos contratos.

O Comitê de Implementação da Modernização do MME segue coordenando esse processo.

O aumento da geração distribuída no Brasil também impulsionou mudanças regulatórias, culminando na revisão da Resolução Normativa nº 482/2012 (revogada pela REN 1059,2023) e na promulgação da Lei nº 14.300/2022, que estabelece o Marco Legal da Geração Distribuída.

A legislação define regras para consumidores que já adotavam esse modelo e estabelece critérios para a compensação da energia injetada na rede.

O Marco Legal tem como objetivo garantir segurança jurídica, estabilidade regulatória e incentivar a expansão da geração descentralizada, especialmente de fontes renováveis como solar fotovoltaica e biogás.

Além disso, busca equilibrar os interesses de consumidores, geradores e distribuidoras, ao esclarecer a divisão de custos e encargos relacionados à infraestrutura elétrica.

3.5.1 Geração distribuída de energia elétrica

De acordo com o Probiogás (2016), a geração distribuída (GD) consiste na produção de energia em pequena escala, geralmente próxima ou no próprio local de consumo.

Essa modalidade pode atender consumidores individuais ou grupos interligados à rede de distribuição da concessionária local.

No Brasil, a definição legal da GD foi formalizada pelo Decreto nº 5.163, de julho de 2004. Conforme o decreto, considera-se geração distribuída aquela realizada por agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo os previstos no artigo 8º da Lei nº 9.074/1995, desde que conectados diretamente à rede de distribuição do comprador.

No entanto, a definição exclui usinas hidrelétricas com potência superior a 30 MW e termelétricas com eficiência inferior a 75%, conforme regulamentação prevista pela ANEEL até dezembro de 2004.

Essa exigência de eficiência não se aplica a termelétricas movidas a biomassa ou resíduos, como nas ETE que utilizam biogás.

Por ser uma forma descentralizada de geração de energia, próxima aos centros consumidores, a GD traz diversos impactos para os setores envolvidos, tanto positivos quanto negativos.

Ao ser analisada sob diferentes pontos de vista, como o das companhias de saneamento, da sociedade civil, do setor elétrico e do meio ambiente, percebe-se que os benefícios e desafios variam de acordo com os interesses e papéis de cada agente.

O Quadro 1, apresentado a seguir, sintetiza os principais pontos positivos e negativos associados à geração distribuída sob essas diversas perspectivas.

Quadro 1 – Biogás gerado no saneamento: Perspectivas, benefícios e desafios setoriais

Ponto de Vista	Vantagens	Desvantagens
Prestadora de Serviço de saneamento	Promove a utilização de fonte de energia, reduzindo os impactos ambientais resultantes de emissões atmosféricas	
	Contribui para a redução de utilização de combustíveis fósseis como fonte de energia	
	Garante benefícios financeiros aos investidores das empresas de saneamento, liberando mais investimentos em outros setores da empresa.	
	Promove segurança no suprimento elétrico da estação. Reduzindo o risco de paradas e do cumprimento da legislação	
	A eletricidade gerada pela GD tem menor custo para o consumidor	
Sociedade	Qualidade e confiabilidade superiores do abastecimento por meio de tecnologias de GD, porque seu sistema elétrico não aceita variações de frequência e/ou tensão	Possível variação da tarifa em função da taxa de utilização da interconexão
	A eletricidade gerada pela GD tem menor custo para o consumidor	Possível tempo de amortização elevado devido ao custo do sistema
	Contribuição para a diversificação da matriz energética, levando a uma maior segurança do suprimento energético	
	Geração de empregos e estabilidade na produção pela indústria nacional, gerando desenvolvimento econômico	
Meio Ambiente	Contribuição na emissão de GEE	
	Minimização dos impactos ambientais pela redução das necessidades de grandes instalações de geração de cargas e extensas linhas de transmissão	
	Diminuição do uso de fontes de energia não renováveis	
	Possibilidade de melhora a eficiência energética	
Setor Elétrico	A diversidade de investimentos privados gerados pela GD tende a ampliar o número de agentes geradores e participantes do setor elétrico regionalmente (COGEN.2013)	

Fonte: adaptado pelo autor – Probiogás, 2017

3.5.2 Micro e minigeração distribuída

A Resolução Normativa ANEEL nº 1059, publicada em 2023, substituiu a antiga REN nº 482/2012 e regulamentou a Lei nº 14.300/2022, estabelecendo o novo marco legal da micro e minigeração distribuída (MMGD) no Brasil.

Essas modalidades envolvem a geração de energia elétrica por fontes renováveis ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio das instalações de unidades consumidoras.

De acordo com a nova norma, os limites de potência permanecem definidos da seguinte forma:

- Microgeração distribuída: potência instalada de até 75 kW;
- Minigeração distribuída: potência superior a 75 kW e até 5 MW, independentemente da fonte.

Segundo Coelho (2023), diferentemente do modelo tradicional de geração centralizada, a MMGD é acessível apenas aos consumidores do mercado cativo e permite que qualquer unidade consumidora (UC) conectada à rede distribuidora participe do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE), desde que possua um sistema gerador no próprio local de consumo ou em local remoto com vínculo comprovado.

A REN nº 1059 introduz regras de transição para os consumidores que aderiram à GD antes de 7 de janeiro de 2023, mantendo benefícios anteriores até 2045. Para novos acessantes, os créditos de energia passam a compensar apenas parte da tarifa, com redução gradual dos componentes compensáveis da TUSD.

A adesão ao SCEE exige o cumprimento de etapas técnicas e regulatórias, desde a solicitação de acesso até a homologação do sistema junto à distribuidora.

A Figura 17 apresenta um fluxograma com as fases necessárias para viabilizar um projeto de geração distribuída conforme a regulamentação vigente.

Figura 17 - Fluxograma para a solicitação de acesso ou consulta de acesso de micro GD



Fonte: Coelho, 2023

A concessionária Light adota critérios específicos para classificar as centrais geradoras enquadradas como geração distribuída. De acordo com sua definição:

- Microgeração distribuída corresponde a unidades com potência instalada de até 75 kW, que operem por meio de cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia, estando conectadas à rede de distribuição por meio das instalações do próprio consumidor;

- Minigeração distribuída refere-se a sistemas com potência superior a 75 kW e limitada a 5 MW, também baseados em fontes renováveis ou cogeração qualificada, e integrados à rede elétrica da distribuidora da mesma forma.

3.5.3 Políticas Energéticas

De acordo com a Abiogás (2018), o setor elétrico brasileiro é amparado por políticas regulatórias que incentivam o uso de fontes renováveis e distribuídas, como o biogás, para geração de energia elétrica. Desde 2004, empreendimentos que utilizam biogás como fonte energética têm acesso a incentivos significativos, como o desconto integral (100%) nas tarifas de uso dos sistemas de transmissão (TUST) e distribuição (TUSD).

Entretanto, com a promulgação da Lei nº 14.300/2022, que estabelece o Marco Legal da Geração Distribuída, esse benefício foi encerrado a partir de 7 de janeiro de 2023.

A legislação, que visa promover um ambiente mais competitivo entre diferentes fontes de energia, introduziu um mecanismo de valorização dos benefícios ambientais das fontes renováveis, incluindo o biogás.

A ideia é criar um mercado mais justo e equilibrado, permitindo que o consumidor final faça escolhas mais conscientes e eficientes em relação à sua fonte de energia.

No entanto, a implementação das novas diretrizes gerou insegurança regulatória até a data de sua efetivação, dificultando decisões de investimento.

Segundo Coelho (2023), o biogás é um combustível gasoso renovável e versátil, permitindo o desenvolvimento de diferentes modelos de negócios para a geração elétrica.

Suas principais vantagens incluem a não intermitência, ou seja, ao contrário das fontes solares, eólicas ou hidrelétricas, o biogás pode ser gerado continuamente, desde que haja substrato disponível para a digestão anaeróbica. Isso garante previsibilidade e segurança energética.

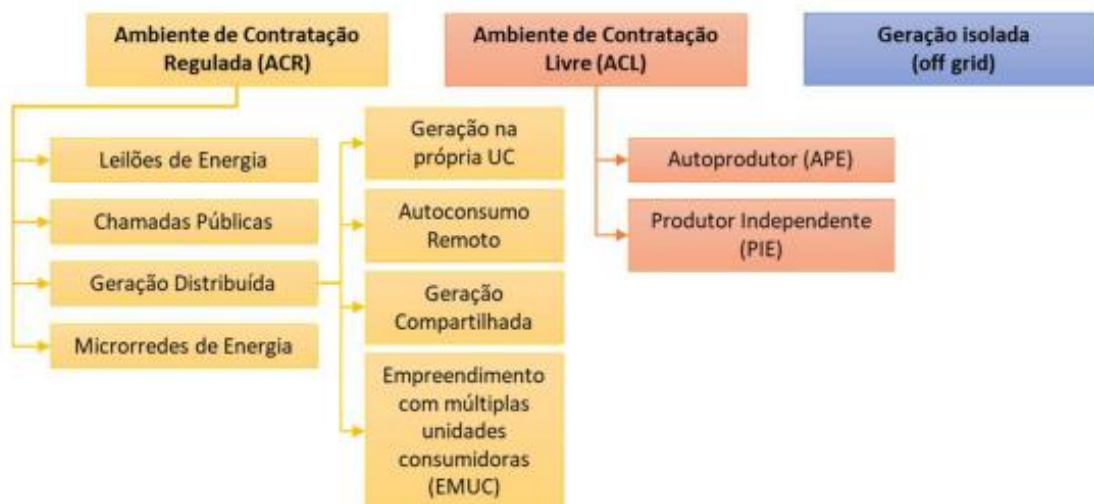
Outra vantagem do biogás é a possibilidade de geração descentralizada, que pode ocorrer próxima a centros urbanos ou em áreas remotas, como zonas rurais.

Isso ajuda a reduzir perdas na transmissão e contribui para a universalização do acesso à energia elétrica, especialmente em regiões com infraestrutura limitada.

Além disso, as usinas termelétricas a biogás se destacam pela agilidade no despacho de energia, podendo ser ativadas rapidamente conforme a necessidade do sistema elétrico nacional.

A seguir, a Figura 18 ilustra os principais modelos de negócios viáveis para projetos de geração elétrica baseados em usinas termelétricas a biogás:

Figura 18 – Modelos de negócio no Setor Elétrico



Fonte: adaptado pelo autor – Coelho, 2023

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), é fundamental distinguir os conceitos de matriz energética e matriz elétrica, pois, embora relacionados, eles possuem finalidades diferentes.

A matriz energética representa o conjunto de todas as fontes de energia utilizadas para suprir as diversas necessidades da sociedade — como o transporte de pessoas e mercadorias, o preparo de alimentos e o funcionamento de indústrias e residências.

Já a matriz elétrica corresponde especificamente às fontes empregadas na geração de eletricidade. Isso significa que a matriz elétrica está inserida dentro da matriz energética, como uma de suas partes.

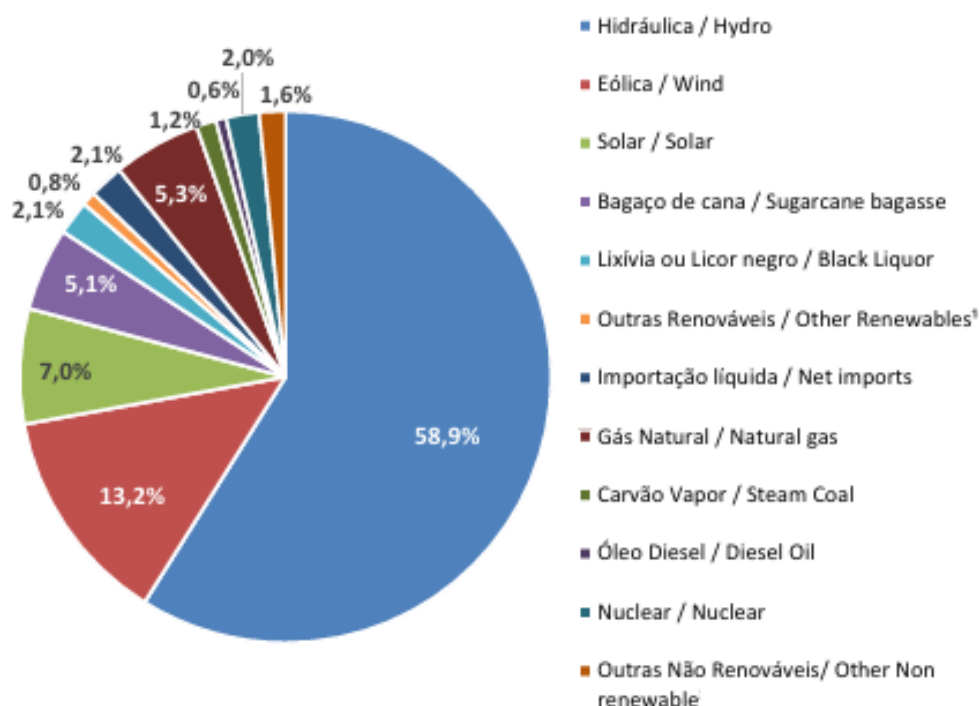
No caso do Brasil, a configuração da matriz energética se destaca no cenário internacional por apresentar uma alta participação de fontes renováveis, o que demonstra um diferencial importante em relação à média global, mais dependente de combustíveis fósseis.

Conforme os dados do Balanço Energético Nacional – BEN (2024), aproximadamente 49,1% da matriz energética brasileira provém de fontes renováveis, como a energia hidráulica, a biomassa da cana-de-açúcar, a lenha, o carvão vegetal, além das fontes eólica e solar.

Esse percentual mostra o compromisso do país com uma transição energética mais sustentável, ainda que existam desafios a serem superados quanto à diversificação e segurança energética. Portanto, ao analisarmos a matriz energética brasileira, percebemos não apenas a diferença conceitual em relação à matriz elétrica, mas também um cenário positivo no uso de fontes limpas, o que coloca o Brasil em uma posição de destaque na busca por um modelo energético mais equilibrado e ambientalmente responsável.

(EPE, 2024.). Para preparar o gráfico da matriz brasileira, usamos dados do Balanço Energético Nacional (BEN), conforme figura 19.

Figura 19 - Oferta interna de energia elétrica por fonte



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética –BEN, 2024

3.5.4 Estrutura tarifária e sistemas de medição na Distribuição de Energia Elétrica

A Resolução Normativa nº 1.000, publicada em 2021 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), consolida as diretrizes para a prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica no Brasil.

Essa norma tem como objetivo principal assegurar maior transparência nas tarifas, promover o uso eficiente dos recursos energéticos e garantir a equidade na cobrança pelo uso da infraestrutura elétrica (ANEEL, 2021).

Entre os instrumentos tarifários regulamentados, destaca-se o sistema de bandeiras tarifárias, mecanismo que sinaliza aos consumidores os custos reais da geração de energia em cada período. As cores verde, amarela e vermelha indicam, respectivamente, condições favoráveis, medianas ou desfavoráveis na produção de energia, ajustando o valor cobrado na fatura mensal.

Essa ferramenta visa aproximar o consumidor das condições operacionais do setor e estimular o uso racional da energia (ANEEL, 2021).

Outro elemento importante na estrutura tarifária é a definição das modalidades tarifárias horárias, que se baseiam na variação da demanda ao longo do dia. Durante os períodos de maior carga, denominados posto ponta, as tarifas são mais elevadas; nos horários de menor uso, chamados fora de ponta, o custo é reduzido. Essa diferenciação busca incentivar o deslocamento do consumo para horários mais econômicos, promovendo o equilíbrio do sistema (ANEEL, 2021).

A norma também regulamenta aspectos relacionados à geração distribuída, como a utilização de sistemas de micro e minigeração.

Nestes casos, a energia gerada que excede o consumo próprio é injetada na rede e convertida em créditos, por meio do Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Esses créditos podem ser utilizados para abater o consumo em períodos subsequentes, incentivando fontes renováveis e a descentralização da produção (ANEEL, 2023).

No que diz respeito à composição tarifária, a norma diferencia entre a Tarifa de Energia (TE), que incide sobre o consumo efetivo de energia elétrica, e a Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), que corresponde ao custo pelo uso da infraestrutura da rede. Ambas são expressas em reais por megawatt-hora (R\$/MWh) ou por quilowatt (R\$/kW), a depender do perfil de consumo do usuário.

A ANEEL também classifica os consumidores em dois grandes grupos: o Grupo A composto por unidades com fornecimento em média ou alta tensão (igual ou superior a 2,3 kV), subdividido por faixa de tensão e modalidade tarifária; e o Grupo B, que compreende os consumidores de baixa tensão.

Dentro desses grupos, categorias como serviço público de água, esgoto e tração elétrica recebem tratamento tarifário específico e devem possuir sistemas de medição individualizados, conforme determina a norma (ANEEL, 2021).

Por fim, a Resolução nº 1.000 também estabelece os requisitos para os sistemas de medição utilizados para faturamento, os quais incluem medidores de energia, transformadores de corrente e potencial, bem como sistemas de comunicação e coleta de dados.

Esses dispositivos são essenciais para garantir a precisão na apuração do consumo e a correta aplicação das tarifas ao consumidor final.

4. RESULTADOS e PRODUTO

Este estudo de caso tem como base o projeto de implantação de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) no município de Barra Mansa, localizado no estado do Rio de Janeiro.

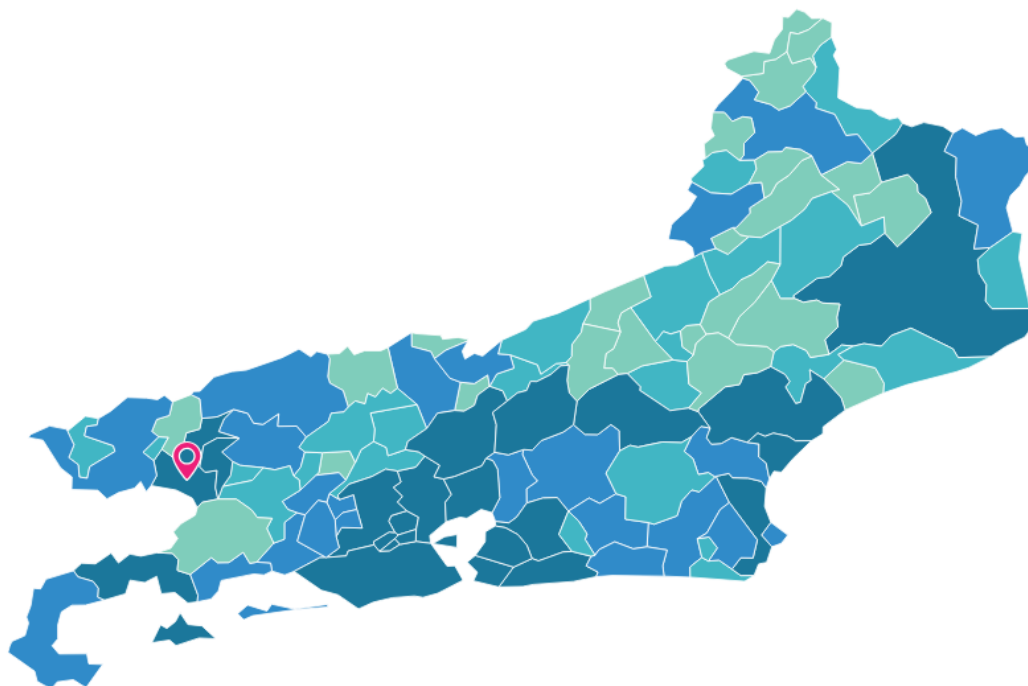
O projeto está vinculado ao Processo de Licitação Pública nº 5829/2018, que trata da contratação de empresa especializada para a execução da infraestrutura necessária à operação da unidade.

A investigação concentra-se na caracterização do lodo gerado durante o tratamento, por meio da análise de suas propriedades físicas e químicas, com o intuito de estimar seu poder calorífico e avaliar seu potencial como biomassa energética. Além disso, a pesquisa aborda os processos de formação, captação e aproveitamento do biogás, detalhando as etapas de geração, purificação e posterior uso como fonte de energia.

Também foram examinados os aspectos econômicos e ambientais relacionados ao aproveitamento energético do biogás, incluindo sua viabilidade técnica e financeira. Essa análise foi complementada por cálculos específicos de estimativa de produção, conversão energética e comparação com outros modelos de recuperação de energia.

A Figura 20, apresentada a seguir, ilustra a localização do município de Barra Mansa no território do estado do Rio de Janeiro, situando geograficamente o projeto analisado.

Figura 20 – Mapa do Estado do Rio de Janeiro



Fonte:

Adaptado pelo autor, IBGE, <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/barra-mansa/panorama>, 2025

O Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Barra Mansa (SAAE-BM) é o órgão responsável pela administração e operação dos sistemas de abastecimento de água potável e coleta e tratamento de esgotos no município de Barra Mansa, estado do Rio de Janeiro.

Em um cenário de crescente urbanização e demanda por soluções ambientalmente sustentáveis, o tratamento de esgotos se destaca como elemento essencial para a proteção da saúde pública e dos corpos hídricos, sendo um dos principais pilares do saneamento básico.

Este trabalho se baseia em um estudo de caso voltado à avaliação da viabilidade técnica e ambiental da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido durante o tratamento de esgotos sanitários. A análise toma como referência o projeto de implantação da Estação de Tratamento de Esgoto 1 – Saudade, cuja construção está prevista para o bairro Saudade, localizado na confluência dos rios Bananal e Paraíba do Sul. A futura estação será gerida pelo SAAE-BM e teve seu projeto executivo desenvolvido pela empresa SERENCO – Serviços de Engenharia Consultiva.

O sistema de tratamento inclui reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB), seguidos por tanques de aeração com tambores biológicos rotativos (BIOUDRUM), decantador secundário e cloração final. Os BIOUDRUMs permitem o contato eficiente do efluente com a biomassa aderida às superfícies rotativas, promovendo oxigenação e remoção da matéria orgânica residual após o tratamento anaeróbio (Kunz, 2019). Embora “Biodrum” seja um termo genérico para tambores biológicos rotativos, os BIOUDRUMs se destacam por sua integração com sistemas UASB e por serem projetados para processos compactos de tratamento secundário, enquanto os Biodrums genéricos podem ser aplicados em diferentes etapas do tratamento conforme a necessidade do projeto (Kunz, 2019).

O empreendimento foi projetado para operar com uma vazão média de 125 litros por segundo (L/s), podendo alcançar até 218 L/s em regime de pico, o que permitirá atender à demanda projetada para uma população de aproximadamente 62.300 habitantes até o ano de 2030.

Embora o sistema anaeróbio previsto tenha potencial para a geração de biogás com valor energético, o projeto original contempla apenas a queima controlada do gás por meio de um sistema Flare, como forma de descarte ambientalmente seguro, sem o aproveitamento energético do recurso.

Diante desse cenário, o presente estudo propõe uma alternativa mais sustentável, baseada na valorização energética do biogás gerado no processo de tratamento.

A proposta prevê a instalação de um motor de combustão interna, que permita converter o poder calorífico do biogás em energia elétrica, promovendo uma solução eficiente e ambientalmente responsável.

Além da redução nas emissões de gases de efeito estufa, essa abordagem pode proporcionar benefícios operacionais significativos, como a autossuficiência energética parcial da ETE e a diminuição

dos custos com o fornecimento de eletricidade pela rede pública, contribuindo para a sustentabilidade técnica e econômica do sistema.

Para fundamentar tecnicamente essa proposta, será conduzida uma análise detalhada de viabilidade energética, envolvendo métodos quantitativos baseados em modelos matemáticos, parâmetros físico-químicos do lodo e taxas de conversão do processo biológico.

A avaliação incluirá o dimensionamento da produção potencial de biogás, a estimativa de seu poder calorífico inferior (PCI), a eficiência da conversão térmica e elétrica, além de aspectos econômicos e ambientais associados à implementação do sistema.

Os resultados obtidos permitirão estimar a capacidade de geração de energia da unidade, comparando cenários com e sem aproveitamento do biogás, e contribuindo para decisões mais sustentáveis no planejamento de infraestrutura de saneamento.

A infraestrutura da ETE 1 – Saudade está organizada em unidades interligadas, que cumprem funções sequenciais no processo de tratamento. Entre os principais componentes do projeto estão:

- Estrutura administrativa;
- Subestação rebaixadora de energia elétrica;
- Módulos de tratamento preliminar, com gradeamento, desarenador e calha Parshall;
- Reatores anaeróbios tipo UASB;
- Tanques de aeração com BIOUDRUM;
- Decantadores secundários com sistema de recirculação e descarte de lodo;
- Unidade de desinfecção por cloração.

Após o tratamento, o efluente será lançado no Rio Paraíba do Sul, atendendo aos padrões de qualidade definidos pelos órgãos ambientais competentes.

O sistema de tratamento foi projetado para remover pelo menos 90% da carga orgânica biodegradável do esgoto bruto, adotando uma configuração híbrida, que integra processos anaeróbios e aeróbios, buscando aliar alta eficiência de remoção à otimização de custos operacionais.

O percurso do esgoto no processo inicia-se na estação elevatória final, que recebe o efluente da rede coletora e realiza a primeira etapa de separação de sólidos de maior porte.

Em seguida, o esgoto é direcionado à unidade de tratamento preliminar, equipada com peneiras e sistema de desarenação, responsáveis pela remoção adicional de sólidos e materiais minerais. Posteriormente, o esgoto passa pela calha Parshall, que mede com precisão a vazão afluente.

Na etapa seguinte, o efluente segue por gravidade até os reatores UASB, que realizam a digestão anaeróbia e promovem a remoção primária da carga orgânica, com eficiência estimada em 65%.

O tratamento secundário é realizado em quatro tanques de aeração, onde estão instalados os

tambores biológicos rotativos do tipo BIOUDRUM.

Esses equipamentos são responsáveis pela complementação da remoção da matéria orgânica que não foi eliminada na etapa anaeróbia anterior, contribuindo para alcançar os padrões exigidos de qualidade do efluente.

Os tambores BIOUDRUM operam parcialmente submersos, com aproximadamente 90% de seu diâmetro imerso no líquido, promovendo o contato contínuo entre o biofilme bacteriano aderido à sua superfície e o esgoto tratado.

Sua função principal não é a oxigenação do meio, como em sistemas de aeração convencional, mas sim a disponibilização de uma grande área superficial para o crescimento e fixação de microrganismos aeróbios, que realizam a degradação biológica da matéria orgânica residual.

A rotação dos tambores promove a movimentação necessária para troca de massa e fixação dos microrganismos, enquanto a oxigenação do sistema é garantida por difusores de bolhas finas, assegurando uma aeração eficiente do meio líquido.

O efluente tratado nos tanques de aeração é encaminhado para os decantadores secundários, onde ocorre a clarificação final.

Parte do lodo sedimentado é recirculado aos tanques para manter o equilíbrio microbiológico, e o restante é direcionado aos reatores UASB, onde é estabilizado anaerobiamente.

Após essa etapa, o lodo passa por desaguamento por centrífugas, reduzindo significativamente seu volume antes do descarte ou reaproveitamento.

A proposta de aproveitar o biogás gerado nos reatores representa uma estratégia inovadora e ambientalmente responsável, transformando um subproduto frequentemente descartado em uma fonte renovável de energia, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência energética da ETE.

4.1 Características do Projeto da ETE

A área do projeto a ser atendida pela ETE 1 – Saudade contempla as bacias 1, 2, 3 e 7, estabelecidas no Plano Municipal de Saneamento Básico de Barra Mansa (2019). Essas bacias concentram parte significativa da população urbana, além de áreas de relevância ambiental, o que reforça a importância estratégica da unidade de tratamento. A implantação da ETE permitirá ampliar a cobertura de esgotamento sanitário, reduzir a carga poluidora lançada nos corpos hídricos e melhorar a qualidade de vida da população atendida. A Figura 21 contempla as bacias do município de Barra Mansa.

4.2.1 Vazões e cargas de DBO afluentes à estação

O dimensionamento da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) fundamenta-se em análises detalhadas dos dados demográficos da área atendida pelo sistema de esgotamento sanitário, além dos parâmetros técnicos definidos nos projetos de engenharia previamente desenvolvidos.

As vazões previstas para o projeto consideram o crescimento populacional estimado até o horizonte temporal planejado, o consumo médio diário de água por habitante, bem como as perdas e infiltrações típicas nas redes coletoras de esgoto.

Conforme os relatórios técnicos no documento SAAE Barra Mansa (2018), responsável pela consultoria e elaboração dos estudos de engenharia e viabilidade, foram estabelecidos três cenários hidráulicos distintos para o sistema: vazão média diária afluente, vazão máxima diária e vazão de pico instantâneo, cada um com impacto direto no dimensionamento das unidades de tratamento.

Além das vazões, a carga orgânica que chega à estação foi avaliada em termos de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), parâmetro fundamental para caracterizar a poluição orgânica do esgoto.

A estimativa da carga de DBO foi realizada a partir de coeficientes padronizados que indicam a geração média de matéria orgânica por habitante equivalente, levando em consideração variações sazonais e os hábitos específicos de consumo da região.

Tais dados são essenciais para garantir que os reatores biológicos atuem com eficiência na remoção da carga orgânica biodegradável.

As estimativas de vazões e cargas foram representadas na Figura 22 a seguir, conforme os dados extraídos dos documentos técnicos SAAE Barra Mansa (2018), que servem como base para o cálculo hidráulico e biológico da ETE projetada.

Figura 22 – População e carga orgânica para vazão úmida - ETE 1 - SAUDADE

ANO	População atendida	Percapita g.DBO/hab.dia	Vazões Médias Secas (l/s)	Carga Orgânica (DBO-kg 02/dia)	Vazões Infiltração (l/s)	Vazões Médias Úmidas (l/s)	Concentração de Cargas Orgânica (DBO - mg 02/L)	Vazões Máximas (l/s)
2010	51.063	50	56,74	2.553,14	28,80	85,54	345	130,93
2015	53.668	50	71,56	2.683,38	28,80	100,36	309	157,60
2020	56.405	50	84,09	2.820,26	28,80	112,89	289	180,16
2025	59.282	50	88,37	2.964,12	28,80	117,18	293	187,88
2030	62.306	50	92,88	3.115,32	28,80	121,68	296	195,99

Fonte: adaptado pelo autor, SAAE Barra Mansa, 2019.

4.2.2 Característica do afluente ao sistema de tratamento adotadas

Para o dimensionamento das unidades da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), foram cuidadosamente considerados os retornos líquidos provenientes das etapas de tratamento da fase sólida. Essa prática garante que a estação mantenha seu desempenho operacional mesmo em condições mais

Visando assegurar confiabilidade e uma margem adequada de segurança, no estudo do documento SAAE (2018), já estão estabelecidos parâmetros de projeto que já incorporam esses retornos, assegurando que as estruturas possam suportar as cargas hidráulicas e orgânicas totais previstas

A Tabela 2 detalha as vazões e cargas utilizadas como referência para o dimensionamento das unidades..

Tabela 2 - População e carga orgânica para vazão úmida - ETE 1 - SAUDADE

Dados	Quantidade	Unidade
Concentração de DBO adotada	300	MgO ₂ /L
Concentração de coliformes termo tolerantes	1E+07	NPM/100mL
Vazão média – Final de plano	10.800,00	m ³ /dia
Carga de DQO	3.240	Kg/dia
Carga de DBO	6.480	Kg/dia
Concentração de DQO	600	mgO ₂ /L
Concentração de SST	375	mg/L
Concentração de N-NKT	50	mgN/L

Fonte: Adaptados pelo autor – SAAE Barra Mansa, 2019

4.2.3 Tratamento adotado

Considerando que a população atual na área atendida pela ETE 1 – Saudade já corresponde a aproximadamente 82% da população projetada para o horizonte do plano de saneamento, optou-se pela implantação completa da estação em uma única fase.

Essa escolha visa atender imediatamente à demanda prevista para o período planejado, evitando ampliações em curto prazo e garantindo maior eficiência operacional desde o início.

Com a base de dados SAAE (2018), verifica-se que a distribuição das vazões da estação conforme os dados técnicos apresentados a seguir, contemplando as vazões médias, máximas e mínimas previstas para o sistema.

O Quadro 2, mostra as fases do processo de tratamento adotadas na concepção do projeto da ETE Saudade.

Detalhamento do Tratamento Adotado		
Fases do Processo	Número de Módulos	Vazão por minuto (L/S)
Tratamento preliminar	2 + 1	Máxima de 110,00
Reatores Anaeróbios	2	Média de 62,50
Tanques de Aeração com Tambor Biológico	4	Média 31,25
Sopradores	2 + 1	-
Decantador Secundário	2	Média de 62,50
Tanque de Contato	1	Máxima de 225,00

Fonte; Adaptado pelo autor – SAAE Barra Mansa, 2019

4.3 Características Gerais da ETE -Saudade

De acordo com o Termo de Referência nº 5829/2018, o transporte do esgoto bruto até a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) ocorre por meio de sistemas de recalque provenientes das Estações Elevatórias EE 7.5 e EE 7.6. Após o bombeamento, o esgoto já passa por uma etapa inicial de gradeamento e é encaminhado à fase de tratamento preliminar, que compreende peneiramento, desarenação e a medição de vazão por meio de uma calha Parshall.

O sistema preliminar adotado é composto por unidades modulares e pré-fabricadas, que integram o peneiramento e a separação de areia, equipadas com mecanismos automáticos de limpeza e injeção de ar, facilitando a remoção de sólidos flutuantes.

Essa etapa será conduzida pela Estação de Pré-Tratamento Mecânico de Efluente (TSF), encarregada da retenção de materiais sólidos mais finos, separação de areia e remoção de resíduos superficiais.

Estão previstas três unidades para essa função, sendo que duas delas operarão simultaneamente com capacidade para processar a vazão máxima de entrada na estação.

Após o pré-tratamento, o esgoto será direcionado por gravidade até os reatores anaeróbios, alimentados por uma calha de distribuição posicionada na parte superior das estruturas. Esses reatores foram projetados em dois módulos simétricos, cada qual dimensionado para processar 62,5 L/s, correspondentes à vazão média prevista.

A calha de distribuição será equipada com tubos alimentadores munidos de luvas reguladoras, que atuarão como vertedores, permitindo o ajuste da vazão distribuída a cada reator. Além disso, a mesma calha também será utilizada para injetar o lodo ativado excedente, que será estabilizado nos próprios reatores anaeróbios.

O efluente resultante dessa etapa seguirá por gravidade para os tanques de aeração e,

posteriormente, para os decantadores secundários. A espuma gerada nos reatores anaeróbios será arrastada pela carga hidráulica até o tanque de lodo, onde será desaguada.

Inicialmente, o biogás gerado nos separadores trifásicos dos reatores seria captado e queimado em um Flare instalado nas proximidades. No entanto, essa abordagem será revista: o biogás passará a ser aproveitado como insumo para geração de energia elétrica, proposta que será detalhada posteriormente neste estudo.

Antes dessa mudança, o gás era coletado nas câmaras de decantação, direcionado por um sistema de exaustão, tratado em lavadores de gases e então liberado na atmosfera.

Nos tanques de aeração, será adotada a tecnologia de Tambores Biológicos (BioDRUMs), que serão acionados com o auxílio de sopradores de ar e difusores de bolhas grossas. A oxigenação necessária para o processo será complementada por um sistema de aeração com difusores de bolhas finas, mais eficientes na transferência de oxigênio.

Ao todo, vinte tambores serão instalados nos módulos de aeração, com cinco unidades por tanque. Esses dispositivos funcionam como suporte para o crescimento da biomassa aderida. Nas áreas dos tanques não ocupadas pelos tambores, haverá uma rede de tubulações com difusores tubulares de bolhas finas, garantindo a aeração da mistura líquida.

O fornecimento de ar será feito por sopradores conectados a uma malha de distribuição.

Concluído o processo de aeração, o efluente será novamente conduzido por gravidade aos decantadores secundários. Após a decantação, o efluente clarificado será encaminhado por meio de tubulação ao tanque de contato com cloro, onde ocorrerá a desinfecção com dosagem adequada do produto químico. O efluente tratado será então lançado no Rio Paraíba do Sul, conforme os padrões estabelecidos pelos órgãos ambientais.

4.3.1 Unidades do tratamento biológico anaeróbio

De acordo com o Termo de Referência nº 5829/2018, o sistema de tratamento biológico anaeróbio da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE 1 – Saudade) será constituído por duas unidades principais: os Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (UASB) e os queimadores de gás tipo flare, responsáveis pela gestão do biogás gerado durante o processo.

Serão instalados dois reatores UASB, dimensionados para receber o esgoto afluente introduzido pela parte superior dos tanques, onde o esgoto será distribuído inicialmente em uma caixa de distribuição.

A partir desse ponto, o esgoto será conduzido de forma uniforme por tubos até os pontos próximos ao fundo do reator, permitindo a subida controlada do líquido através do leito de lodo.

O efluente tratado será coletado por canaletas vertedoras localizadas na parte superior dos reatores

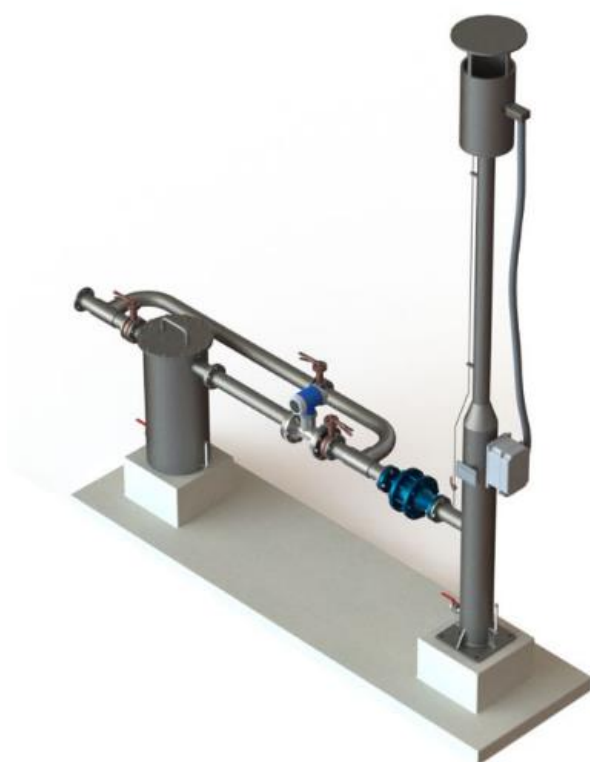
e encaminhado por gravidade aos tanques de aeração.

A espuma formada, resultante da carga hidráulica do sistema, será direcionada diretamente para o tanque de lodo, onde passará pelo processo de desaguamento.

Durante a etapa anaeróbia, ocorre a geração de biogás, que é armazenado nas câmaras de gás dos reatores.

Este gás será captado e transportado até os queimadores do tipo flare, situados próximos aos reatores, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 - Queimador tipo Flare



Fonte: Adaptado pelo autor Wotta Engenharia, 2025

Conforme especificado no Termo de Referência nº 5829/2018, a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE 1 – Saudade) utilizará um sistema anaeróbio composto por duas unidades principais: os reatores anaeróbios do tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) e queimadores de biogás do tipo flare, que terão a função de controlar e eliminar o gás gerado durante o processo.

Serão instalados dois reatores UASB, projetados para receber o esgoto bruto pela parte superior. O líquido será distribuído por meio de uma caixa localizada na entrada e, em seguida, conduzido por tubos até regiões próximas ao fundo dos tanques, permitindo sua subida controlada por entre o leito de lodo anaeróbio.

O esgoto tratado será recolhido por calhas vertedoras na parte superior dos reatores, sendo então transportado por gravidade até os tanques de aeração.

A espuma resultante da movimentação hidráulica será desviada diretamente para o tanque de lodo, onde passará pelo processo de desaguamento.

Concluída a etapa de aeração, o efluente segue por gravidade aos decantadores secundários e, posteriormente, é conduzido a um tanque de contato, onde recebe dosagem de cloro para desinfecção. Após esse processo, o efluente tratado é lançado no Rio Paraíba do Sul, configurando a etapa mais crítica do sistema, por se tratar do ponto de interface direta com o corpo hídrico receptor.

Durante a digestão anaeróbia, o biogás gerado será coletado nas câmaras de gás acopladas aos reatores.

Esse gás será direcionado até os queimadores do tipo flare, que estarão posicionados próximos às unidades reatoras, conforme ilustrado na Figura 23.

4.3.2 Cargas Elétricas de força da ETE Saudade

A seguir segue o Quadro 3, que contempla os principais equipamentos elétricos a serem instalados na Estação de Tratamento de Esgoto, conforme Termo de Referência nº 5829/2018.

Quadro 3 - Relação dos principais Equipamentos Elétricos de Força da ETE Saudade

Equipamento	Potência em CV	Quantidade	Total em CV
Sopradores	50,00	2	100,00
Raspador de lodo	3,00	1	3,00
Elevatória - Retorno Lodo	15,00	1	15,00
Elevatória de Excesso de Lodo	2,00	1	2,00
Elevatória de Espuma Secundária	1,00	1	1,00
Bomba dosadora/ outros	1,00	3	3,00
Bombeamento Lodo	3,50	1	3,50
		Total	127,50

Fonte: Autor adaptado do termo de referência 5829/2018

A adequada estimativa das cargas de força é essencial para o dimensionamento do sistema de alimentação elétrica da ETE, garantindo que toda a infraestrutura elétrica — incluindo a subestação rebaixadora de energia, quadros de comando, painéis de automação e sistemas de emergência — esteja preparada para suportar o funcionamento contínuo e seguro da estação, inclusive durante os picos de

O levantamento dessas cargas permite também a avaliação da viabilidade de implantação de sistemas complementares, como o de geração de energia a partir do biogás produzido nos reatores anaeróbios.

4.4 Potencial Energético do Biogás Gerado em Reatores UASB

A projeção da quantidade de energia elétrica passível de ser gerada a partir do biogás oriundo dos reatores anaeróbios do tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) é um aspecto essencial na análise da viabilidade da recuperação energética em sistemas de tratamento de esgoto. Conforme orientações do Manual do Probiogás (2016), essa estimativa pode ser realizada utilizando uma equação específica que permite calcular o potencial energético do biogás produzido no processo.

$$P = QCH_4 \times PCI(CH_4) \times \eta_{el} \quad (6)$$

Onde:

P = Potencial de geração de energia elétrica (kWh/dia)

QCH_4 = Vazão de metano (m^3 /dia)

$PCI(CH_4)$ = Poder calorífico inferior do metano (10 kWh/ m^3)

η_{el} = Eficiência elétrica do motogerador (36%)

A vazão de metano (QCH_4) é estimada a partir do volume total de biogás gerado nos reatores, multiplicado pela concentração média de metano presente na mistura, geralmente entre 60% e 70%. Esse valor é fundamental para o cálculo do potencial energético do biogás. Considerando o poder calorífico inferior médio do biogás, estimado em cerca de 10 kWh/ m^3 segundo o Manual do Probiogás (2016), que se baseia em Moran et al. (2010, apud BRASIL, 2015), e uma eficiência média de conversão elétrica em torno de 36% (BRASIL, 2015), é possível estimar com boa precisão a energia elétrica que pode ser gerada e aproveitada na estação. Essa análise é essencial para justificar o uso do biogás como fonte renovável, contribuindo para a viabilidade econômica e ambiental do sistema ao reduzir o consumo de energia da ETE e as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, o aproveitamento do biogás reforça a autonomia energética da ETE e contribui para metas de sustentabilidade ambiental.

4.4.1 Dimensionamento de gasômetro para armazenamento de biogás

Embora a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) opere continuamente, 24 horas por dia, são necessárias paradas programadas para manutenção e ajustes técnicos ao longo do ano.

Por isso, a instalação de um gasômetro é essencial no sistema de aproveitamento energético do biogás.

Segundo Cabral (2019), o gasômetro funciona como um dispositivo de compensação, assegurando a uniformidade na vazão de biogás que alimenta os equipamentos, prevenindo variações bruscas que possam afetar o desempenho do motogerador ou causar desperdícios.

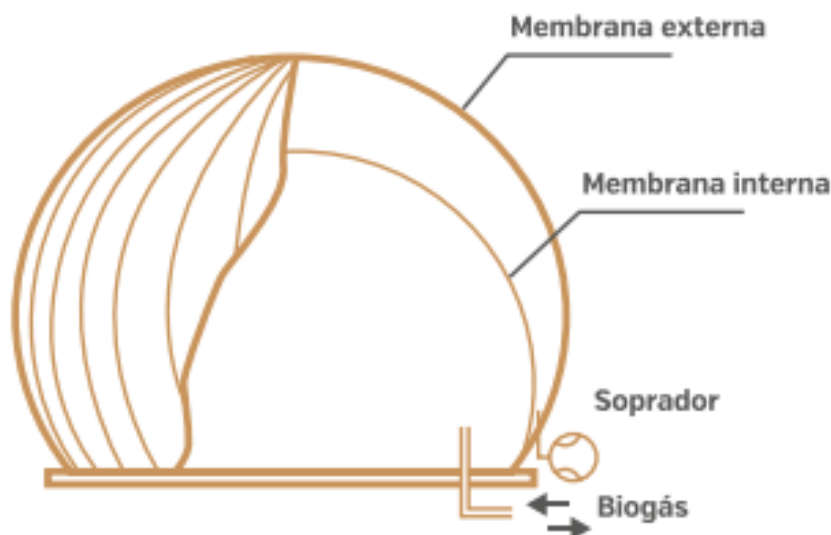
Inicialmente, o gás é direcionado a um tanque de drenagem primário, cuja função é retirar resíduos líquidos e sólidos — como condensados e partículas — da corrente gasosa.

Essa etapa é fundamental para evitar o bloqueio das tubulações e o desgaste precoce dos componentes do sistema.

Em seguida, o biogás é armazenado no gasômetro, cuja função principal é equilibrar a vazão entre a produção nos reatores anaeróbios (UASB) e o consumo do motogerador, evitando perdas por excesso de gás ou interrupções durante momentos de baixa geração.

Para este estudo, foi escolhido um gasômetro de membrana dupla, ilustrado na Figura 24, amplamente reconhecido por oferecer maior estabilidade operacional, segurança e flexibilidade no armazenamento, mesmo quando há variações na produção de biogás.

Figura 24 - Gasômetro



Fonte; Probiogas (2016)

O dimensionamento do gasômetro deve ser realizado com atenção para garantir que o volume armazenado seja suficiente para acomodar a produção diária de biogás.

Além disso, o volume deve ser dimensionado de forma a minimizar a queima frequente do excesso de gás em flares e assegurar que a integridade da estrutura do equipamento não seja comprometida por esvaziamentos excessivos.

Conforme o Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (2022) ,o volume requerido para o gasômetro pode ser calculado considerando as variações entre os períodos de geração e consumo do biogás, por meio das equações a seguir:

$$V_{consumo} = Q_{consumo} \times t_{operação} \quad (7)$$

Onde:

$V_{consumo}$ = Volume do gasômetro para armazenamento do biogás para consumo (m^3).

$Q_{consumo}$ = Vazão necessária para suprimento do consumo de biogás ($m^3.hora^{-1}$).

$t_{operação}$ = Tempo de operação da unidade consumidora de biogás (horas).

$$V_{geração} = Q_{geração} \times t_{paralisação} \quad (8)$$

Onde:

$V_{geração}$ = Volume do gasômetro para armazenamento do biogás gerado (m^3)

$Q_{geração}$ = Produção do biogás no biodigestor ($m^3/hora$)

$t_{paralisação}$ = Tempo de paralisação, sem consumo do biogás (horas).

O maior valor calculado entre as equações de consumo e geração deve ser adotado como o volume mínimo exigido para o gasômetro.

Para assegurar a confiabilidade e segurança do sistema, recomenda-se aplicar um fator de segurança de 10% a 20% sobre o volume estimado.

O dimensionamento adequado do gasômetro é fundamental não só para garantir a eficiência energética do processo, mas também para evitar emissões indesejadas de gases de efeito estufa e maximizar o uso do biogás como fonte renovável de energia.

4.5 Estimativa de Custos

A avaliação econômica de empreendimentos voltados ao saneamento ambiental, como a implantação de sistemas de tratamento de esgoto com aproveitamento energético, exige a distinção clara entre dois tipos principais de despesas: CAPEX (Capital Expenditure) e OPEX (Operational Expenditure).

O CAPEX corresponde aos investimentos iniciais necessários para a implantação do sistema, abrangendo a construção civil, a aquisição e instalação dos equipamentos, bem como a conexão entre as unidades de tratamento.

Para a ETE Saude, esse custo inicial engloba os gastos relacionados às estruturas do tratamento preliminar, aos reatores anaeróbios tipo UASB e ao sistema de captação, armazenamento e aproveitamento do biogás.

No Quadro 4, a seguir, estão indicados os percentuais adotados, baseados nos critérios do Probiogás (2016).

Quadro 4 – Composição do Capex

Equipamento	Porcentagem sobre o custo total
Elaboração do projeto	3%
Unidade Moto-Gerador	56%
Sistema de Tratamento de Biogás	7%
Gasômetro	11%
Sistema de captação do biogás	5%
Sistema de transporte do biogás	3%
Instalações Elétricas	8%
Medição de composição do biogás	4%
Sistema de queima c/queimador aberto	3%

Quadro 4 – Adaptado pelo autor – Probiogás, 2017.

Trata-se, portanto, de um investimento único, realizado exclusivamente na etapa de implantação. Por sua vez, o OPEX corresponde aos custos operacionais e de manutenção que ocorrem continuamente durante a vida útil do sistema, englobando despesas com energia elétrica, mão de obra, insumos químicos (como o cloro), monitoramento da qualidade do efluente, manutenção dos equipamentos e reposições eventuais.

Esses custos são essenciais para assegurar a eficiência e a sustentabilidade operacional a longo prazo.

Conforme Cabral (2019), é fundamental que os projetos de estações de tratamento considerem não apenas os investimentos iniciais, mas também os custos recorrentes de operação.

Complementando essa perspectiva, Souza et al. (2004, apud Cabral, 2019) indicam que as despesas anuais com operação e manutenção correspondem a cerca de 4% do investimento total (CAPEX), valor que deve ser incorporado nas avaliações de viabilidade financeira.

Dessa forma, neste estudo, o OPEX foi estimado com base nesse percentual médio, aplicado ao investimento inicial e projetado para cada ano da vida útil da estação.

Essa metodologia possibilita uma análise custo-benefício mais completa, levando em conta tanto o retorno energético proporcionado pelo biogás quanto os custos operacionais ao longo do tempo.

Essa abordagem integrada é fundamental para garantir a sustentabilidade financeira e ambiental do sistema ao longo de sua operação.

Uma variável relevante a ser considerada é a depreciação dos equipamentos. Segundo Britto e

Andreo (2017), a depreciação é calculada adotando-se uma vida útil estimada de 20 anos para projetos de ETE, conforme apresentado na equação (9)

$$.D = \frac{100\% \times C}{V_u} \quad (9)$$

Onde:

D = Depreciação dos equipamentos;

C = Custo total dos equipamentos;

V_u = Vida útil (anos).

4.5.1 Custo de produção de eletricidade a partir do biogás em uma ETE

O cálculo do custo para a produção de eletricidade a partir do biogás gerado em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) baseia-se na metodologia desenvolvida por Silveira et al. (2012) e posteriormente aplicada por Xavier (2016), conforme apresentado por Cabral (2019), ilustrada na equação (10) a seguir. Essa metodologia avalia a relação entre o investimento inicial do projeto e o potencial de geração de energia elétrica, amortizado por uma taxa de juros previamente definida.

A esse valor são acrescentados os custos operacionais e de manutenção, possibilitando uma estimativa mais realista do custo total de geração..

$$C_{el} = \frac{(inv\ planta) \times f \times C_{o\&m}}{P_{geracaoEE} \times 1000} \quad (10)$$

Onde:

$$f = \frac{qkx(q-1)}{qk-1} \quad (11)$$

Com:

$$q = 1 + \frac{i}{100} \quad (12)$$

Sendo:

C_{el} = Custo com a produção de eletricidade (R\$/kWh);

Inv_{pl} = Investimento total com a unidade (R\$);

P_{geraçãoEE} = Potencial de geração de energia elétrica (MWh/ano);

f = Fator de anuidade (1/ano);

C_{o&m} = Custo com operação e manutenção;

k = Vida útil da unidade;

i = Taxa de juros.

4.5.2 Cálculo da receita gerada

Para estimar a receita proveniente da venda de eletricidade, será utilizada a média ponderada das tarifas de energia (TE) praticadas pela distribuidora local, conforme a equação (13).

Serão considerados os valores tarifários referentes aos períodos de ponta — que correspondem ao intervalo de maior demanda na rede elétrica.

Conforme Cabral (2019), esse período é geralmente definido entre 18h00 e 21h00, enquanto a concessionária LIGHT estabelece o horário de ponta entre 17h30 e 20h30. Serão considerados ambos para fins de análise.

Essa metodologia proporciona uma estimativa mais precisa da receita, ao levar em conta as variações nos preços da energia elétrica ao longo do dia.

As definições dos horários de ponta e fora de ponta, bem como as tarifas aplicadas, seguem as normas estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2023).

$$T_{final} = \frac{[(TE_p + T_{up}) \times H_p] + [(TE_{fp} + T_{us}) \times H_{fp}]}{24 \times 1000} \quad (13)$$

Onde:

T_{final} = Tarifa de Energia ponderada (R\$/kWh);

TE_p = Tarifa de Energia do horário de ponta (R\$/MWh);

T_{USD_p} = Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição – horário de ponta (R\$/MWh);

H_{fp} = Quantidade de horas do horário fora de ponta (horas).

E a receita será estimada pela equação (14)

$$Receita = P_{geraçãoEE} \times (T_{final} - C_{el}) \times 1000 \quad (14)$$

Receita = Ganho anual gerado pela injeção da energia gerada na rede de distribuição (R\$/ano)

C_{el} = Custo com a produção de eletricidade (R\$/KWh);

$P_{geraçãoEE}$ = Potencial de geração de energia elétrica (MWh/ano).

4.6 Viabilidade Econômica

A viabilidade econômica do projeto será avaliada por meio de uma análise detalhada dos custos, abrangendo desde a fase de implantação até a depreciação dos equipamentos da unidade.

Posteriormente, será considerada a receita anual proveniente da operação da planta de geração de eletricidade. Com base nesses dados, serão aplicadas técnicas clássicas de análise de investimentos, como o prazo de recuperação do capital investido (Payback) e o Valor Presente Líquido (VPL).

No início, todo projeto envolve um período de desembolsos financeiros vinculados à aquisição e instalação da unidade produtiva. Em seguida, ocorre a geração de receitas líquidas, ou seja, receitas deduzidas dos custos operacionais. O intervalo necessário para que essas receitas igualem o investimento inicial é conhecido como período de recuperação. Esse indicador pode ser calculado a partir de fluxos de caixa simples ou descontados, conforme exposto por Cabral (2019).

Conforme Bordeaux-Rêgo (2013), a decisão sobre a viabilidade do projeto demanda critérios técnicos rigorosos. A melhor forma de guiar essa decisão é por meio da simulação econômica-financeira do investimento, em que os fluxos de caixa projetados são confrontados com o montante investido para avaliar o retorno esperado.

Para este estudo, serão adotados os modelos determinísticos descritos nas Técnicas de Análise de Projetos, entre as diversas metodologias disponíveis.

4.6.1 Payback simples

Conforme Miranda (2011), o Payback é um dos métodos mais simples para análise de investimentos.

Basicamente, consiste em calcular quantos períodos são necessários para que o investidor recupere o capital aplicado inicialmente no projeto.

O processo envolve a soma cumulativa dos fluxos de caixa líquidos gerados ao longo do tempo até que o total seja igual ao valor investido.

O momento em que isso ocorre determina o prazo de retorno do investimento, ou seja, o Payback.

Embora seja amplamente usado por sua simplicidade, esse método possui limitações importantes. Como destacado por Miranda (2011), o Payback tradicional não considera o valor do dinheiro no tempo, desconsiderando os efeitos da taxa de juros durante o período analisado.

Essa falha é corrigida pelo Payback descontado, que atualiza os fluxos futuros de caixa usando uma taxa de desconto definida.

Mesmo assim, o Payback simples permanece bastante utilizado em avaliações iniciais, devido à sua facilidade de aplicação e à rapidez em fornecer uma estimativa do tempo necessário para recuperar o investimento.

Por definição, esse método indica o número de períodos — sejam anos, meses ou semanas — que o investimento leva para ser totalmente recuperado.

As equação (15) representada abaixo é utilizada para cálculo do payback simples.

$$PS = \frac{\text{Investimento inicial}}{\text{Fluxo de Caixa anual}} \quad (15)$$

4.6.2 Payback descontado

O Payback descontado é uma versão aprimorada do método tradicional, que se diferencia por incorporar o valor do dinheiro ao longo do tempo.

Ao contrário do Payback simples, que não leva em consideração os juros ou a taxa de desconto, essa abordagem atualiza os fluxos de caixa futuros ao valor presente, utilizando uma taxa de desconto vinculada ao custo de capital da empresa.

Dessa forma, os valores atualizados são confrontados com o investimento inicial realizado na data zero (BORDEAUX-RÊGO, 2013).

Neste trabalho, o Payback descontado será adotado como um dos critérios para avaliar a viabilidade econômica do projeto.

Esse método determina o tempo necessário para que os fluxos de caixa descontados sejam suficientes para cobrir o valor investido inicialmente, considerando a remuneração mínima exigida pelo investidor.

Em outras palavras, indica o período em que a soma dos fluxos de caixa, trazidos ao valor presente por meio da Taxa Mínima de Atratividade (TMA), iguala o montante desembolsado (PEREIRA 2016).

A aplicação do Payback descontado oferece uma avaliação mais rigorosa da viabilidade financeira, evitando superestimar investimentos cujo retorno se estenda por prazos mais longos.

A equação (16), apresentada a seguir, detalha o cálculo utilizado para essa análise.

$$PD = \sum_{k=1}^j \left(\frac{FC_k}{(1+TMA)^k} \right) \quad (16)$$

Onde:

PD: payback descontado;

FC_k: fluxo de caixa no ano k

K: ano considerado

TMA; taxa mínima de atratividade.

4.6.3 Valor Presente Líquido (VPL)

O Valor Presente Líquido é uma ferramenta amplamente empregada na análise econômica de investimentos, reconhecida por sua eficiência em medir a viabilidade financeira de projetos. Essa técnica consiste em trazer para o momento atual os fluxos de caixa futuros, utilizando como referência uma taxa de desconto, que normalmente corresponde à Taxa Mínima de Atratividade (TMA) do empreendimento ou da organização.

O cálculo do VPL envolve a soma dos valores atualizados dos fluxos de caixa previstos ao longo do horizonte do projeto, descontando o investimento inicial (FC_0), conforme descrito por Miranda (2011). Essa abordagem, que incorpora o conceito do valor do dinheiro no tempo, permite avaliar se os retornos estimados justificam o capital aplicado.

Quando o VPL apresenta resultado positivo, indica-se que o projeto deve gerar valor econômico superior ao custo do capital investido; já um valor negativo sugere que os retornos não são suficientes para compensar o investimento.

Conforme Bordeaux-Rêgo (2013), o método do fluxo de caixa descontado, que é outra denominação para o VPL, fundamenta-se em quatro elementos essenciais na análise financeira de um projeto:

- Montante inicial investido;
- Projeção dos fluxos de caixa gerados;
- Períodos em que esses fluxos se manifestam;
- E o grau de risco associado a esses fluxos.

A equação (17), que será apresentada a seguir, formaliza o cálculo do Valor Presente Líquido e constitui uma das principais ferramentas para a avaliação econômica adotada neste trabalho.

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{Fct}{(1+r)^t} + \frac{VR}{(1+R)^n} \quad (17)$$

Onde:

I é o investimento;

FC_t é o fluxo de caixa líquido na data “t”;

r é o custo de capital definido pela empresa;

VR é o valor residual.

R: Taxa de desconto aplicada especificamente ao valor residual (normalmente $R = r$, a mesma taxa usada nos fluxos de caixa)

n: Número total de períodos do projeto

No cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), é possível incluir o valor residual (VR) do projeto ao final do horizonte de análise, correspondente ao último período avaliado.

Esse valor residual corresponde à estimativa de retorno relacionado a ativos, equipamentos ou benefícios remanescentes após o encerramento da vida útil do projeto — como a possibilidade de revenda de bens ou economias futuras que extrapolam o período de avaliação.

Dessa forma, o VPL passa a refletir, de maneira integrada, os quatro elementos fundamentais para análise de viabilidade: o investimento inicial, os fluxos de caixa esperados, os momentos em que ocorrem esses retornos e o risco associado, representado pela taxa de desconto adotada.

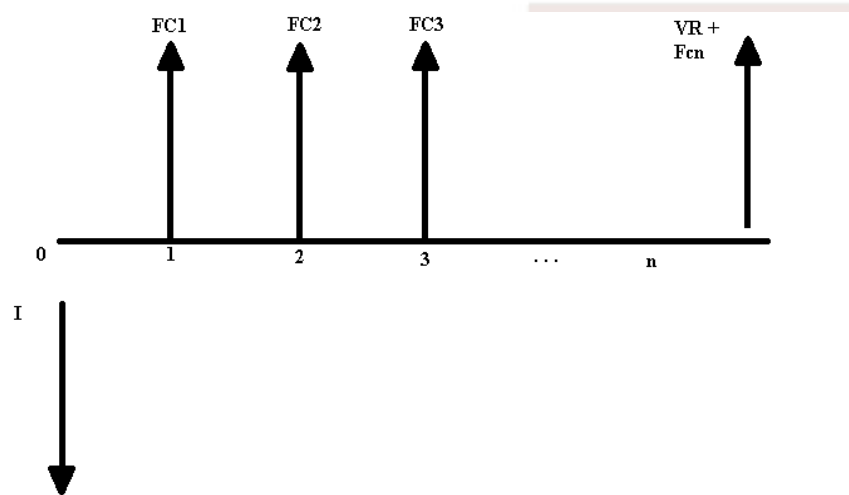
O procedimento consiste em atualizar os fluxos de caixa e o valor residual ao valor presente, e então subtrair o capital investido no início do projeto.

De acordo com a abordagem tradicional, conforme Bordeaux-Rêgo (2013), utiliza-se a mesma Taxa Mínima de Atratividade (r) tanto para descontar os fluxos periódicos quanto o valor residual.

O resultado do VPL reflete o saldo líquido do projeto, já considerado o custo de oportunidade do capital. Por isso, trata-se de um dos métodos mais completos e confiáveis para apoiar decisões sobre a viabilidade econômica de investimentos.

Seguindo essa lógica, a Figura 25 ilustra visualmente a estrutura de um fluxo de caixa típico em projetos de investimento.

Figura 25 Fluxo de caixa de um projeto



Fonte: Adaptado pelo autor - Bordeaux-Rêgo (2013)

De acordo com Bordeaux-Rêgo (2013), o uso do Valor Presente Líquido (VPL) como ferramenta de apoio à decisão é bastante direto e segue uma lógica financeira clara.

Esse método permite comparar os retornos financeiros esperados de um projeto — atualizados com base em uma taxa de desconto específica — com o valor inicialmente investido.

Com isso, a tomada de decisão pode ser sistematizada da seguinte maneira:

- Se o VPL for maior que zero, o projeto apresenta retorno superior ao exigido e é economicamente viável;
- Se o VPL for igual a zero, o projeto se torna indiferente sob o ponto de vista financeiro, pois os ganhos igualam a remuneração mínima esperada;
- Se o VPL for negativo, o projeto não compensa o investimento e, portanto, deve ser descartado.

Quando o resultado do VPL é positivo, significa que o valor presente dos fluxos de caixa futuros, ao serem descontados pela taxa de atratividade i , supera o valor aplicado inicialmente. Isso indica que:

- O investimento é recuperado ao longo do tempo;
- Os rendimentos superam o retorno mínimo exigido pelo investidor;
- O projeto gera um ganho real de valor equivalente ao VPL no momento zero, contribuindo para a criação de riqueza.

Essa modelo parte do pressuposto de que os recursos gerados pelo projeto ao longo do tempo poderão ser reinvestidos à mesma taxa utilizada na atualização dos fluxos, o que assegura consistência interna ao método de avaliação.

4.6.4 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é amplamente utilizada como alternativa ao método do Valor Presente Líquido (VPL) na avaliação da viabilidade econômica de projetos.

Seu principal atrativo está na forma simples com que expressa, por meio de um único percentual, o rendimento estimado de um investimento, facilitando tanto a análise quanto a comparação entre diferentes propostas.

Conceitualmente, a TIR corresponde à taxa de desconto que iguala o valor presente dos fluxos de caixa futuros ao valor do investimento inicial, ou seja, o ponto em que o VPL se torna nulo.

Com base nisso, um projeto será considerado viável do ponto de vista econômico se a TIR superar a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) previamente estabelecida pelo investidor.

De acordo com Bordeaux-Rêgo (2013), o método do valor presente líquido é o mais amplamente aplicável entre as ferramentas de análise financeira.

Por esse motivo, será adotado como base neste estudo.

4.7 Produto

A avaliação teórica da viabilidade do aproveitamento energético do biogás, com base nas estimativas da quantidade gerada, da energia elétrica a ser produzida e da análise econômica do potencial retorno financeiro do investimento, será apresentada neste capítulo da dissertação.

Essa abordagem considera não apenas os aspectos técnicos relacionados à conversão do biogás em energia elétrica, mas também avalia a viabilidade econômica do projeto, levando em conta os custos operacionais, as receitas previstas e os principais indicadores financeiros pertinentes.

4.7.1 Cálculo da produção de biogás

Os principais parâmetros de projeto são a seguir relacionados:

Dados e Características de Projeto:

- Vazões médias de afluentes no projeto adotadas para o cálculo (L/s):

Média 125,00

Máxima (pico) 218,00

- Esgoto afluente ao tratamento:

Concentração de DBO (gO_2/m^3) 300,00

Concentração de SST (g/m^3) 375,00

Para o estudo da produção de biogás com o objetivo de aproveitamento energético, foram utilizados dados provenientes do Processo Licitatório nº 5859/2018, realizado pela SAAE de Barra Mansa, conforme descrito abaixo na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3 – Dados da produção do biogás da ETE Saudade

Item	Medida	Quantidade
Reator UASB	unidade	2,00
Volume do metano liberado no biogás	m^3/d	716,51
Concentração de metano no biogás	%	0,75
Vazão de biogás	m^3/d	955,35
Vazão de biogás	m^3/h	39,81

Fonte: adaptada pelo autor – SAAE (2018)

4.7.2 Cálculo da produção de energia elétrica

Conforme descrito no item 4.4:

$$P = 3432,25 \text{ kWh/d}$$

Considerando o mês com 30 dias, então a produção mensal de kWh será de 103.177 kWh.

$$Pd = \frac{\text{Produção mensal}_{\text{mês}}^{\text{kWh}}}{30} \quad (18)$$

O consumo horário será calculado utilizando a equação a seguir

$$Cd = \text{Produção} \frac{\text{diária}}{24h} \quad (19)$$

O consumo horário calculado foi de 143,30kWh.

Com base em uma pesquisa realizada em julho de 2025 junto a três empresas fornecedoras de grupos moto-geradores de energia elétrica (SULTEC, JAMBACK e TOKENGENHARIA), verificou-se que a potência dos geradores é normalmente especificada em kVA (quilovolt-ampères), enquanto o consumo dos equipamentos elétricos é comumente informado em kW (quilowatts).

Para realizar a conversão de kW para kVA, é essencial considerar o fator de potência (FP), que indica o grau de aproveitamento da energia elétrica pelo sistema. Esse fator, em aplicações residenciais ou comerciais, costuma variar entre 0,8 e 1.

A conversão é feita por meio da seguinte fórmula:

$$kVA = \frac{kW}{FP} \quad (20)$$

Onde:

kVA = Potência do gerador em kVA

kW = Potência do gerador em kW

FP = Fator de potência

O dimensionamento do grupo moto-gerador de energia elétrica para atender à demanda prevista foi feito considerando um fator de potência padrão de 0,8, valor comumente utilizado em especificações de geradores. Com base nesse parâmetro, a potência necessária foi calculada em 180 kVA.

Para a definição da capacidade do gerador, considerou-se sua operação em regime contínuo, ou seja, em funcionamento durante 24 horas por dia. Com o objetivo de garantir maior confiabilidade ao sistema, facilitar os procedimentos de manutenção e aumentar a disponibilidade dos equipamentos, optou-se pela instalação de dois grupos moto-geradores.

Cada um operaria em turnos alternados de 12 horas diárias, assegurando a redundância operacional do sistema.

O custo estimado do gerador foi calculado com base nos valores apresentados por Cabral (2019), atualizados monetariamente por meio da Calculadora do Cidadão, ferramenta disponibilizada pelo Banco Central do Brasil (ver anexo).

O valor resultante foi de R\$ 317.960,00 (trezentos e dezessete mil, novecentos e sessenta reais), sendo arredondado para R\$ 318.000,00 (trezentos e dezoito mil reais) para fins de cálculo do investimento inicial na implantação da unidade.

4.7.3 Cálculo dos custos de investimento – Capex

Para a estimativa dos custos de implantação do sistema de geração de energia elétrica (CAPEX), adotou-se a metodologia proposta pelo Probiogás (2016), que serviu de base para a elaboração da Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo do custo de investimento – Capex, ETE - Saudade

Equipamento	Custo - Real R\$
Elaboração do projeto	17.035,71
Unidade Motor-Gerador	636.000,00
Sistema de Tratamento de Biogás	39.750,00
Gasômetro	62.464,29
Sistema de captação de biogás	28.392,86
Sistema de transporte de biogás	17.035,71
Instalações Elétrica	45.428,57
Medição de composição de biogás	22.714,29
Sistema de queima c/queimador aberto	17.035,71
Total	885.857,14

Fonte: Adaptada pelo autor - Probiogás (2017)

4.7.4 Cálculo dos custos de operação e manutenção – OPEX

Nos diferentes cenários analisados, os custos operacionais considerados referem-se, essencialmente, à mão de obra e aos serviços de manutenção preventiva e corretiva. De acordo com Cabral (2019), citado por Souza et al. (2004), os gastos anuais com operação e manutenção correspondem, em média, a 4% do valor total investido na unidade.

Com base nessa proporção, o custo anual estimado para operação e manutenção é de R\$ 22.714,28 (vinte e dois mil, setecentos e quatorze reais e vinte e oito centavos).

4.8 Análise Financeira

Este tópico tem como objetivo analisar a viabilidade econômica da implementação de um sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs).

A análise está centrada na potencial redução dos custos operacionais e na melhoria da eficiência no uso dos recursos energéticos disponíveis.

4.8.1 Custo com a produção de eletricidade

De acordo com a metodologia descrita por Cabral (2019), o cálculo do custo de geração de eletricidade baseia-se na amortização do investimento total ao longo da vida útil da unidade geradora, por meio da aplicação do fator de anuidade. Esse fator permite transformar o valor investido em parcelas anuais constantes, levando em consideração uma taxa de juros composta, sendo fundamental para estimar o custo anualizado da energia gerada.

Os cálculos seguem as equações apresentadas no item 4.6 deste trabalho, utilizando os fundamentos da engenharia econômica para determinar o custo nivelado da eletricidade (LCOE).

Para a análise, serão consideradas três taxas de juros distintas — 15%, 12% e 8% — representando diferentes cenários de custo de capital.

A Tabela 5, a seguir, apresenta os fatores de anuidade correspondentes a cada uma dessas taxas, que serão aplicados na amortização do investimento e na composição do fluxo de caixa anual da planta de geração.

Tabela 5 – Custo com a produção de eletricidade – ETE Saudade

Período	Custo 15%	Custo 12%	Custo 8%
Anos	R\$/kWh	R\$/kWh	R\$/kWh
1	0,85	0,83	0,80
2	0,47	0,45	0,43
3	0,34	0,33	0,31
4	0,28	0,26	0,24
5	0,24	0,23	0,21
6	0,22	0,20	0,18
7	0,20	0,19	0,17
8	0,19	0,17	0,15
9	0,18	0,16	0,14
10	0,17	0,16	0,14
11	0,17	0,15	0,13
12	0,16	0,14	0,12
13	0,16	0,14	0,12
14	0,15	0,14	0,12
15	0,15	0,13	0,11
16	0,15	0,13	0,11
17	0,15	0,13	0,11
18	0,15	0,13	0,10
19	0,14	0,13	0,10
20	0,14	0,12	0,10

Fonte; adaptada de Cabral, 2019

4.8.2 Receita com a produção de eletricidade

Seguindo a metodologia indicada por Cabral (2019), a receita gerada pela venda da energia elétrica produzida a partir do biogás foi calculada conforme a equação 14. A receita anual (R\$/ano), mostrada na Tabela 6, representa o valor obtido a partir da tarifa nas modalidades Horo - sazonal Verde (Figura 26) e Horo - sazonal Azul (Figura 27).

Essa receita corresponde à diferença entre a tarifa praticada pela distribuidora local e o custo de produção da eletricidade ao longo da vida útil da unidade, estimada em 20 anos.

As tarifas de energia consideradas para o cálculo foram extraídas das tarifas aplicadas pela concessionária Light durante o ano de 2025, contemplando as variações nos períodos de ponta e fora de ponta.

O valor médio ponderado, utilizado na análise, foi determinado pela equação 13, cujos resultados estão apresentados na Tabela 6

Já o custo de produção da eletricidade foi estimado segundo os critérios de amortização descritos anteriormente, conforme apresentado na Tabela 5.

Dessa forma, a receita líquida anual é calculada pela diferença entre a tarifa média ponderada e o custo nivelado de geração da energia, refletindo o retorno financeiro potencial da injeção da eletricidade na rede de distribuição. A Figura 26 ilustra a tarifa horo-sazonal verde praticada pela concessionária Light.

Figura 26 – Tarifas de média tensão de energia elétrica - Tarifa Verde

TARIFA DE MÉDIA TENSÃO - ESTUTURA HORO-SAZONAL VERDE																	
Nível de Tensão	Demanda R\$/kW			Consumo R\$/MWh						Demanda de Ultrapassagem R\$/kW			Demandade Ultrapassagem R\$/kW				
	TUSD + TE	TUSD	TE	Ponta			Fora Ponta						TUSD + TE	TUSD	TE		
				TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE								
				A4 (2,3 a 25kV)	22,78	22,78	0,00	1.475,84	945,56	530,28	508,59	161,87				346,72	45,56
AS (Subterrâneo)	19,61	19,61	0,00	2.978,85	2.447,45	531,40	616,88	269,04	347,84	39,22	39,22	0,00	39,22	39,22	0,00		

Fonte: adaptada pelo autor, Light, acessado pelo <https://www.light.com.br/SitePages/page-entenda-a-conta-da-sua-empresa.aspx,2025>

Segundo a concessionária LIGHT (2025), a tarifa verde é destinada a consumidores com fornecimento em tensão inferior a 69 kV.

Essa modalidade tarifária estabelece dois preços distintos para o consumo de energia (em R\$/MWh), que variam conforme o horário de utilização — classificados como Horário de Ponta e Fora de Ponta.

Além disso, existe uma cobrança fixa relacionada à demanda de potência contratada, independente do consumo efetivo. Esse modelo tarifário é particularmente vantajoso para consumidores que conseguem

ajustar ou reduzir seu consumo durante o Horário de Ponta.

A Figura 27 apresenta os valores praticados pela Light para a tarifa azul.

Figura 27 – Tarifas de média tensão de energia elétrica - Tarifa Azul

TARIFAS DE MÉDIA TENSÃO / ALTA TENSÃO - ESTRUTURA HORO-SAZONAL AZUL																		
Nível de Tensão	Demanda R\$/kW						Consumo R\$/MWh						Demanda de Ultrapassagem R\$/kW					
	Ponta			Fora Ponta			Ponta			Fora Ponta			Ponta				Fora Ponta	
	TUSD+TE	TUSD	TE	TUSD+TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE
A2 (88 a 138kV)	24,75	24,75	0,00	16,15	16,15	0,00	631,16	102,44	528,72	447,59	102,44	345,15	49,50	49,50	0,00	32,30	32,30	0,00
A4 (2,3 a 25kV)	32,37	32,37	0,00	22,78	22,78	0,00	692,15	161,87	530,28	508,59	161,87	346,72	64,74	64,74	0,00	45,56	45,56	0,00
AS (Subterrâneo)	89,97	89,97	0,00	19,61	19,61	0,00	800,44	269,04	531,40	616,88	269,04	347,84	179,94	179,94	0,00	39,22	39,22	0,00

Fonte: adaptada pelo autor, Light, acessado pelo <https://www.light.com.br/SitePages/page-entenda-a-conta-da-sua-empresa.aspx>, 2025

Assim como a tarifa verde, a tarifa azul é obrigatória para consumidores com fornecimento em tensões iguais ou superiores a 69 kV, sendo opcional para aqueles com tensões inferiores.

Ambas as modalidades tarifárias consideram o consumo de energia e a demanda de potência, aplicando valores diferenciados para cada um.

No caso da demanda, a cobrança varia entre os períodos de ponta e fora de ponta. Já para o consumo de energia, são adotadas tarifas distintas conforme o horário de utilização.

Tabela 6 - Receita -Tarifa Horosazonal Verde e Azul

Receita -Tarifa Horosazonal Verde			Receita -Tarifa Horosazonal Azul		
Taxa 15%	Taxa 12%	Taxa 8%	Taxa 15%	Taxa 12%	Taxa 8%
-274778,09	-248202,38	-212768,09	-396065,877	-369490,163	-334055,88
199052,47	219797,62	247196,19	77764,686	98509,836	125908,41
355972,60	375131,90	400215,36	234684,815	253844,117	278927,58
433672,55	452302,94	476498,92	312384,772	331015,158	355211,13
479692,65	498212,23	522088,98	358404,872	376924,442	400801,20
509881,47	528494,38	552333,09	388593,684	407206,595	431045,30
531032,67	549850,61	573808,91	409744,890	428562,823	452521,13
546544,27	565632,06	589805,40	425256,491	444344,275	468517,62
558304,98	577700,93	602149,86	437017,197	456413,151	480862,08
567448,75	587174,93	611938,78	446160,972	465887,149	490651,00
574697,79	594765,63	619869,99	453410,011	473477,846	498582,21
580534,00	600947,67	626408,79	459246,221	479659,886	505121,01
585291,34	606049,86	631877,37	464003,557	484762,079	510589,59
589208,57	610307,25	636505,93	467920,788	489019,464	515218,15
592460,94	613892,32	640463,33	471173,157	492604,533	519175,55
595179,96	616934,55	643876,25	473892,173	495646,763	522588,47
597466,20	619533,02	646841,60	476178,418	498245,239	525553,82
599397,88	621764,86	649434,80	478110,096	500477,082	528147,02
601036,66	623690,99	651715,41	479748,876	502403,207	530427,63
602431,78	625360,14	653731,11	481143,995	504072,361	532443,33

Fonte: Elaboração própria.

Após a realização dos cálculos, a modalidade tarifária Horo–Sazonal Verde apresentou o maior retorno de receita, sendo, portanto, a escolhida para continuidade deste estudo.

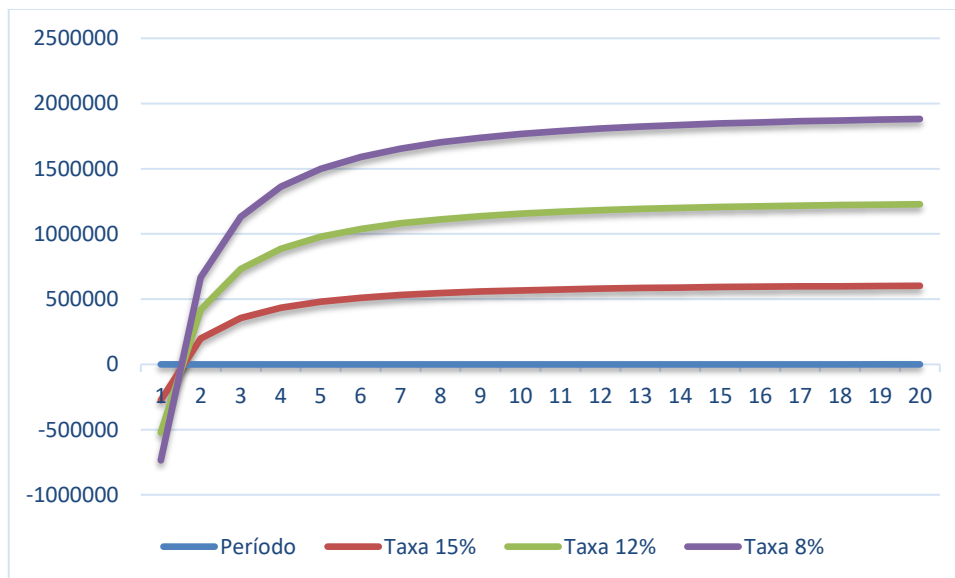
4.8.3 Payback

A avaliação do Payback foi realizada por meio da análise do fluxo de caixa anual, utilizando os dados apresentados nas Tabelas 5 e 6 como base para os cálculos. Esse método permitiu estimar o período necessário para que o investimento inicial fosse completamente recuperado por meio da receita gerada pela venda da eletricidade produzida a partir do biogás gerado na estação de tratamento de esgoto.

Durante a análise, foram considerados os custos de implantação, operação e manutenção, bem como as receitas provenientes da comercialização da energia elétrica, permitindo uma avaliação realista da viabilidade financeira do projeto.

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos no estudo do payback, evidenciando o tempo estimado para o retorno do investimento e contribuindo para a tomada de decisão quanto à implementação do sistema.

Figura 28 – Projeção do Payback – ETE Saudade



Fonte; Elaboração própria

Os resultados da análise indicam que, à medida que o sistema opera, os custos relacionados à geração de eletricidade a partir do biogás tendem a reduzir progressivamente. Essa diminuição é ainda mais acentuada quando são consideradas diferentes taxas de amortização — 15%, 12% e 8% — que impactam diretamente o prazo para o retorno do investimento inicial.

No caso específico da futura Estação de Tratamento de Esgoto Saudade, avaliou-se o potencial de produção de biogás e sua utilização na geração de energia elétrica.

A projeção aponta que o ponto de payback — momento em que o custo da eletricidade gerada internamente se torna inferior à tarifa cobrada pela concessionária local — será atingido após aproximadamente 1 ano e 7 meses de operação contínua.

Essa estimativa demonstra o potencial retorno financeiro associado ao aproveitamento energético do biogás, reforçando a viabilidade econômica e ambiental do projeto.

Além disso, evidencia o papel estratégico dessa fonte renovável na redução dos custos operacionais em sistemas de saneamento, tornando essa alternativa especialmente atraente sob a ótica da sustentabilidade e eficiência energética.

4.8.4 Valor Presente Líquido – VPL

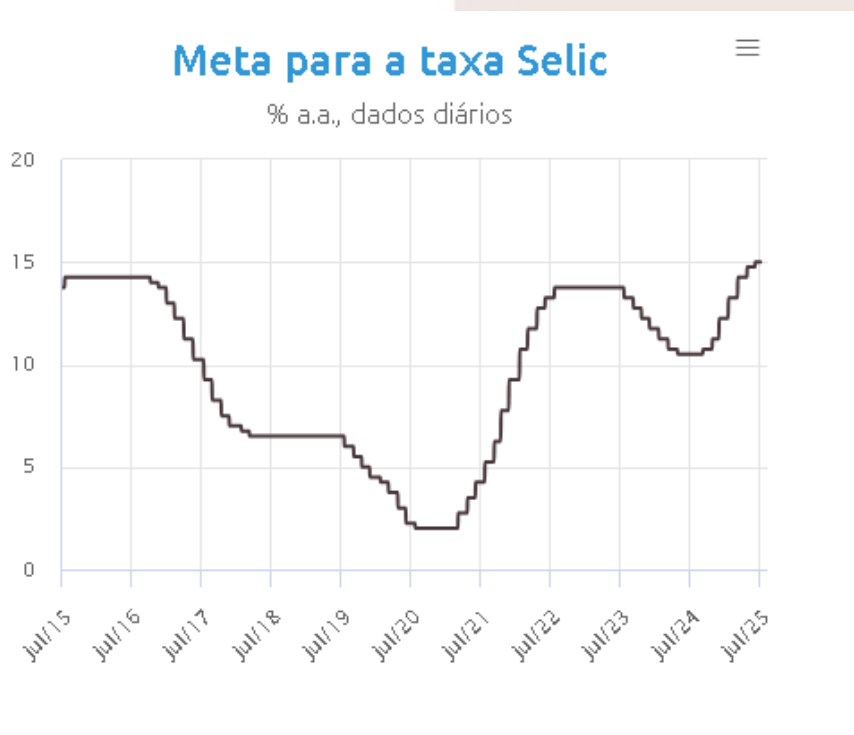
Para o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), foi empregada a Equação 17. A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) adotada baseou-se na taxa Selic, que é a taxa básica de juros da economia brasileira e influencia diversas outras taxas, como empréstimos, financiamentos e aplicações financeiras.

A taxa Selic é o principal instrumento de política monetária do Banco Central (BC) para o controle da inflação.

Sobre essa base, foram adicionados o índice de inflação projetado e um percentual extra para cobrir as incertezas e riscos relacionados às variações do mercado.

Dessa forma, a taxa utilizada para a TMA foi fixada em 15%, conforme os dados apresentados pelo Banco Central, ilustrados na Figura 29 a seguir.

Figura 29 – Taxa SELIC



Fonte: Banco Central, acessado <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>, 2025

A Tabela 7 apresenta a análise detalhada do fluxo de caixa anual da planta de geração de energia, expressa em R\$/ano.

A partir dos dados avaliados, é possível observar que, para ambas as propostas analisadas, o Valor Presente Líquido (VPL) se torna positivo em um intervalo relativamente curto de tempo, indicando que o investimento recupera seu valor inicial rapidamente.

Essa condição positiva do VPL evidencia a viabilidade econômica do projeto, sinalizando que a planta tem potencial para gerar retornos financeiros consistentes ao longo de sua vida útil.

Além disso, a análise reforça a eficiência da aplicação dos recursos, contribuindo para a tomada de decisões estratégicas no planejamento e implementação do sistema de geração de energia a partir do biogás.

Portanto, os resultados obtidos confirmam a atratividade econômica do projeto, destacando sua relevância como alternativa sustentável e financeiramente viável.

Tabela 7 – Análise de fluxo de caixa por ano – ETE Saudade

Análise de fluxo de caixa por ano (R\$/ano)			
Período/ano	taxa 15%	Taxa 12%	Taxa 8%
0	-885857,14	-885857,14	-885857,14
1	-238935,24	-221606,97	-197005,11
2	323605,55	371473,54	440820,84
3	812771,45	901009,71	1031400,42
4	1238133,11	1373809,86	1578233,37
5	1608012,80	1795952,85	2084560,18
6	1929647,32	2172866,23	2553381,29
7	2209329,52	2509396,04	2987474,92
8	2452531,42	2809869,08	3389413,46
9	2664011,34	3078148,59	3761578,78
10	2847906,92	3317683,86	4106176,29
11	3007816,12	3531554,63	4425248,07
12	3146867,60	3722510,69	4720684,89
13	3267781,93	3893007,16	4994237,51
14	3372924,83	4045236,15	5247526,97
15	3464353,43	4181154,90	5482054,25
16	3543856,56	4302510,92	5699209,14
17	3612989,72	4410864,51	5900278,48
18	3673105,52	4507608,79	6086453,79
19	3725380,12	4593987,61	6258838,35
20	3770836,29	4671111,56	6418453,67

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao considerar toda a vida útil da planta de geração de energia a partir do biogás, os resultados obtidos para o Valor Presente Líquido (VPL) indicam que o investimento é economicamente viável, apresentando elevado potencial de retorno.

O VPL positivo, identificado ainda nos primeiros anos de operação, demonstra que os benefícios financeiros superam os custos ao longo do tempo, o que evidencia uma excelente atratividade econômica.

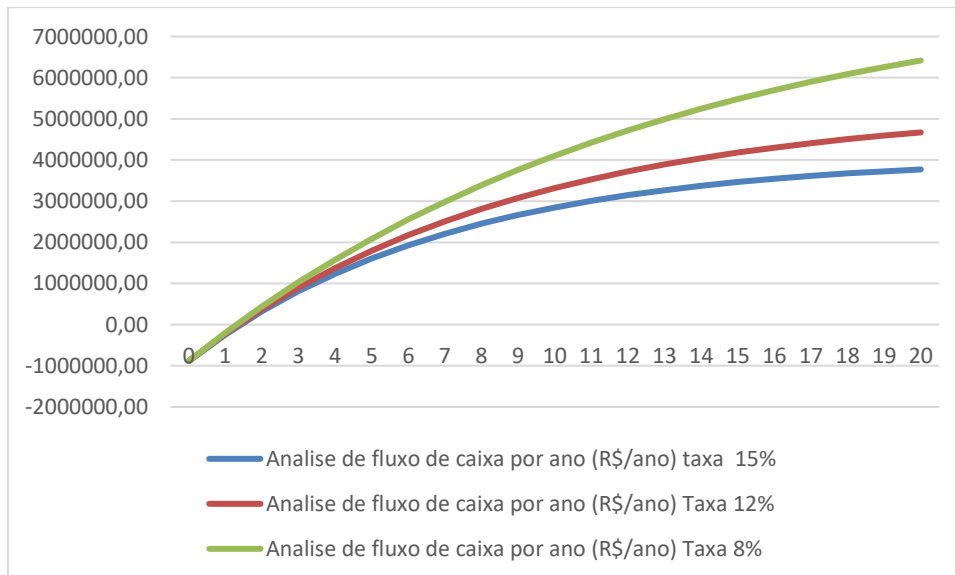
Além disso, os resultados reforçam a robustez da proposta, mesmo em cenários conservadores, nos quais as projeções são mais cautelosas em relação às variáveis de mercado e à geração de receita.

Isso mostra que o projeto não apenas se sustenta financeiramente, como também se configura como uma alternativa estratégica e eficiente para a valorização energética de resíduos, especialmente no contexto de estações de tratamento de esgoto.

A Tabela 7 apresenta os dados detalhados da análise de fluxo de caixa ano a ano (R\$/ano), possibilitando a visualização clara da evolução dos ganhos ao longo do tempo.

Complementarmente, a Figura 30 ilustra graficamente esses resultados, permitindo uma interpretação visual do desempenho financeiro do projeto, reforçando as conclusões obtidas por meio dos cálculos apresentados.

Figura 30 – Análise de fluxo de caixa por ano- ETE Saudade



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.8.5 Taxa Interna de Retorno –TIR

Conforme demonstrado na Tabela 8, a Taxa Interna de Retorno (TIR) do investimento apresentou um comportamento crescente ao longo do tempo, atingindo seu ápice no décimo ano de operação.

A análise revela que, para os três cenários considerados — com taxas de amortização de 15%, 12% e 8% — a TIR alcança valores expressivos, consolidando a atratividade financeira do projeto.

Especificamente, no período de 10 anos, observou-se uma TIR de 69% para os cenários com taxas de 15% e 8%, e de 63% para o cenário com taxa de 12%, evidenciando um desempenho econômico robusto. A partir do 15º ano, os valores da TIR estabilizam-se, mantendo-se constantes até o 20º ano de análise.

Esse comportamento indica que o retorno financeiro se consolida ainda na primeira metade da vida útil da planta, contribuindo para a redução do risco do investimento.

Tabela 8 – Análise da Taxa de Interna de Retorno do Investimento – ETE Saudade

Taxa Interna de retorno - período de 20 anos			
Período	TIR 15%	TIR 12%	TIR 8%
5	53%	46%	53%
10	69%	63%	69%
15	70%	64%	70%
20	70%	64%	70%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O estudo da TIR confirma, portanto, a elevada rentabilidade do projeto, uma vez que todos os valores obtidos superam significativamente a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) considerada na análise.

Esses resultados, aliados ao VPL positivo, reforçam a viabilidade econômica da implantação do sistema de geração de energia a partir do biogás em estações de tratamento de esgoto

5 DISCUSSÃO

Nesta seção, realiza-se uma análise da aplicabilidade prática da tecnologia no contexto da futura subestação a ser instalada no município de Barra Mansa.

Além de avaliar a funcionalidade operacional do sistema, são considerados os impactos positivos que essa implantação poderá gerar para a comunidade local, abrangendo aspectos econômicos, ambientais e sociais.

Serão discutidos também os desafios técnicos e estratégicos envolvidos, bem como as oportunidades para otimização e replicabilidade do projeto em outras localidades com características semelhantes.

Dessa forma, busca-se compreender o real potencial da tecnologia para contribuir com o desenvolvimento sustentável da região.

5.1 Aplicabilidade da Energia Gerada a partir do Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto: Estudo de Caso para o Município de Barra Mansa

A geração de energia elétrica a partir do aproveitamento do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto (ETE) configura-se como uma alternativa estratégica para o setor de saneamento, tanto sob a perspectiva ambiental quanto econômica.

No contexto do município de Barra Mansa, a proposta de implantação de uma futura subestação de energia elétrica voltada para a valorização energética do biogás tem como objetivo principal promover o uso eficiente dos recursos renováveis disponíveis localmente, reduzindo a dependência da rede elétrica convencional e, consequentemente, os custos operacionais das unidades de tratamento.

A aplicabilidade desse modelo é justificada pela capacidade de autossuprimento energético que a tecnologia pode oferecer, especialmente considerando o elevado consumo energético das ETEs.

A eletricidade gerada neste estudo poderá ser utilizada diretamente para alimentar bombas, sistemas de aeração, iluminação, painéis de controle e demais equipamentos essenciais ao funcionamento da estação, conforme detalhado no Quadro 3.

Adicionalmente, eventuais excedentes energéticos poderão ser armazenados ou, desde que haja regulamentação e viabilidade técnica, injetados na rede de distribuição local, contribuindo para a diversificação e sustentabilidade da matriz energética municipal.

Outro aspecto relevante é o alinhamento dessa proposta com as diretrizes de sustentabilidade e economia circular, visto que o biogás, subproduto da digestão anaeróbia do lodo, deixa de ser um passivo ambiental para se tornar uma fonte de energia limpa e economicamente viável.

Isso representa uma contribuição significativa para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e para a valorização dos resíduos gerados no processo de tratamento de esgoto.

Portanto, a implantação da subestação em Barra Mansa, na Estação de Tratamento de Esgoto Saudade, baseada na utilização do biogás como insumo energético, demonstra-se plenamente aplicável e estratégica. Além de reduzir os gastos com energia elétrica e promover a sustentabilidade ambiental, o projeto fortalece a autonomia energética do sistema de saneamento municipal, podendo ainda servir como modelo replicável para outras localidades com características similares.

Este estudo também possui um alto potencial de repetição em regiões que dispõem de resíduos orgânicos urbanos ou rurais e enfrentam desafios relacionados à conservação da biodiversidade e à mitigação das mudanças climáticas.

Ao transformar resíduos em energia elétrica e subprodutos úteis, a tecnologia contribui para a redução de emissões de gases de efeito estufa, o uso eficiente de recursos naturais e a autossuficiência energética local. Regiões com disponibilidade de matéria-prima e infraestrutura mínima para digestão anaeróbia podem adotar este modelo, promovendo sustentabilidade ambiental, economia circular e desenvolvimento econômico.

5.2 Impacto Para a Sociedade

A implantação de um sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás, proveniente das estações de tratamento de esgoto em Barra Mansa, apresenta impactos significativos para a sociedade local. Sob o ponto de vista ambiental, essa iniciativa contribui diretamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa, especialmente do metano, um dos principais responsáveis pelo aquecimento global.

Além disso, promove a valorização dos resíduos gerados no processo de tratamento, fortalecendo práticas de economia circular e reduzindo a pressão sobre fontes não renováveis de energia.

No aspecto socioeconômico, a geração própria de energia permite uma considerável redução nos custos operacionais das estações, o que pode refletir em menores tarifas e melhores serviços para a população.

A adoção dessa tecnologia limpa pela gestão pública também representa um incentivo à inovação e à modernização do setor de saneamento.

Ademais, a implantação e operação do sistema têm potencial para gerar empregos locais, além de estimular a capacitação técnica da mão de obra regional, fortalecendo o desenvolvimento econômico e social da comunidade.

Outro ponto importante é o caráter educativo do projeto, que pode servir como instrumento de sensibilização e conscientização ambiental para a população, promovendo o uso responsável dos recursos naturais e o incentivo ao consumo de energias renováveis.

Por fim, a experiência acumulada com essa iniciativa poderá ser replicada em outros municípios, ampliando os benefícios sociais, econômicos e ambientais para uma escala regional.

Dessa forma, trata-se de uma solução técnica viável e socialmente relevante, alinhada aos princípios do desenvolvimento sustentável e capaz de promover impactos positivos duradouros para a sociedade.



6 CONCLUSÃO

O estudo de viabilidade econômica para a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na futura Estação de Tratamento de Esgoto Saudade, localizada no município de Barra Mansa, demonstrou que o projeto é financeiramente atrativo e apresenta um excelente retorno econômico. Este estudo gerou dois produtos principais: o primeiro, um Relatório Técnico do Aproveitamento do Biogás para a Geração de Energia Elétrica, no qual foram analisadas de forma detalhada a capacidade de geração de eletricidade a partir do biogás — estimada em 143,3 kWh —, as tecnologias adotadas e demais aspectos técnicos do sistema, incluindo um gerador de 180 kVA; e o segundo, um Relatório Financeiro, que contempla as análises econômicas e financeiras do projeto.

A análise financeira indicou que o payback do investimento inicial ocorrerá em aproximadamente 1 ano e 7 meses, evidenciando um retorno rápido e significativo para os investidores. A redução progressiva dos custos de geração de eletricidade ao longo do tempo, aliada à avaliação sob diferentes taxas de amortização (15%, 12% e 8%), comprova a flexibilidade e viabilidade do projeto em cenários econômicos variados.

O cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) apresentou resultados positivos desde os primeiros anos de operação, confirmando que os benefícios financeiros superam os custos, o que reforça a sustentabilidade econômica da iniciativa mesmo sob condições conservadoras. Quanto à Taxa Interna de Retorno (TIR), os valores alcançados foram expressivos, destacando-se a taxa de 69% no 10º ano para as amortizações de 15% e 8%, e 63% para o cenário de 12%. Estes índices superam amplamente a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), evidenciando a elevada rentabilidade e a capacidade do projeto de gerar valor substancial ao longo de sua vida útil.

No âmbito ambiental, o projeto se sobressai ao contribuir significativamente para a sustentabilidade, reduzindo a dependência da rede elétrica convencional e minimizando as emissões de gases de efeito estufa. Essa iniciativa está alinhada com as metas de economia circular e eficiência energética, promovendo um modelo de gestão mais responsável e inovador para o setor de saneamento.

Além dos benefícios ambientais, a geração de energia a partir do biogás proporciona redução dos custos operacionais e promove a autossuficiência energética das estações de tratamento, fortalecendo sua função estratégica dentro do município.

De forma resumida, o projeto de geração de energia elétrica a partir do biogás na futura Estação de Tratamento Saudade, em Barra Mansa, mostra-se financeiramente viável, com retorno rápido, VPL positivo e TIR elevada. Além disso, representa uma solução sustentável e eficiente para o setor de

saneamento, alinhada aos princípios da economia verde e das fontes renováveis, podendo servir como modelo para futuras implementações em outras localidades.

Embora o sistema tenha sido completamente dimensionado e avaliado, com a elaboração de dois produtos principais: o Relatório Técnico – Estudo de Viabilidade Técnica, detalhando a capacidade de geração de energia, tecnologias adotadas e especificações do gerador de 180 kVA com produção estimada de 143,3 kWh, e o Relatório Técnico – Plano Financeiro, contemplando análises econômicas, VPL, TIR e payback,, ressalta-se que a tecnologia ainda não foi fisicamente instalada nem operada.

Portanto, a solução proposta está em estágio de pré-implantação, caracterizando-se como uma tecnologia projetada e validada em estudo de viabilidade, pronta para futura implementação assim que a infraestrutura da estação estiver disponível. Essa abordagem garante que os aspectos técnicos, econômicos e ambientais sejam devidamente considerados antes da efetiva instalação, reduzindo riscos e assegurando eficiência na operação futura do sistema.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica; revoga as Resoluções Normativas ANEEL nº 414, de 9 de setembro de 2010; nº 470, de 13 de dezembro de 2011; nº 901, de 8 de dezembro de 2020 e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 21 jan. 2022. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.html>. Acesso em: 20 jun. 2025.

ANEEL. *Estrutura tarifária de energia elétrica*. Brasília: ANEEL, 2023. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: jun.2025.

ALUGA GERA. *Diferenças entre motores do ciclo Otto e ciclo Diesel*. Disponível em: <https://alugagera.com.br/noticias/diferencas-entre-motores-do-ciclo-otto-e-ciclo-diesel>. Acesso em: jun. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12209: projeto de estação de tratamento de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 2011..

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS (ABiogás). Programa Nacional do Biogás e Biometano – PNBB. São Paulo: ABiogás, 2018. Disponível em: https://uploads-ssl.webflow.com/632ab10950c5e334290bfadf/6390dd3aaa9ca8211589e557_PNBB.pdf. Acesso em: 6 jun. 2025..

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS (ABiogás). Potencial de produção de biogás a partir do tratamento do esgoto: perspectivas para a universalização sustentável dos serviços de esgotamento sanitário no Brasil. São Paulo: ABiogás, 2021. 33 p. Publicação elaborada por: ABES, ABiogás, CIBiogás, GEF Biogás Brasil, INCT ETEs Sustentáveis, Instituto 17/Programa de Energia para o Brasil (BEP), Sabesp e Sanepar.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO BIOGÁS E DO BIOMETANO (ABiogás). O guia do produtor: planejamento e desenvolvimento do seu projeto. [S.l.]: ABiogás, [2025]. Disponível em: <https://abiogas.org.br/wp-content/uploads/protectedfiles/Guia-do-Produtor-ABiogas.pdf>. Acesso em: fev. 2025.

BICALHO, Ronaldo Gulart; ALMEIDA, Edmar Luiz Fagundes de. Turbina a gás: oportunidades e desafios. **Revista Brasileira de Energia**, v. 8, n. 1, 2018. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/download/141/124/>. Acesso em: jun. 2025.

BARRA MANSA (RJ). Plano Municipal de Saneamento Básico. Barra Mansa, RJ: SERENCO, 2019. Disponível em: <www.serenco.com.br>. Acesso em: [05, 03, 2025].

BRASIL. Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995. Estabelece normas para outorga e prorrogações das concessões e permissões de serviços públicos e dá outras providências. **Diário Oficial da União:** Seção 1, Brasília, DF, n. 130, p. 10427, 8 jul. 1995.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012.** Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. **Diário Oficial da União:** Seção 1, Brasília, DF, 18 abr. 2012

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023.** Estabelece as condições de operação e as regras de comercialização... **Diário Oficial da União,** Brasília, DF, 10 fev. 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html>. Acesso em: 20 jun. 2025.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Resolução ANP nº 886, de 29 de setembro de 2022.** **Diário Oficial da União:** Seção 1, Brasília, DF, 29 set. 2022.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Resolução ANP nº 906, de 18 de novembro de 2022.** **Diário Oficial da União:** Seção 1, Brasília, DF, 18 nov. 2022.

BRASIL. **Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004.** Regulamenta a Lei nº 10.848/2004, dispondo sobre critérios técnicos e econômicos da outorga de concessão ou autorização para geração e comercialização de energia elétrica. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, 30 jul. 2004.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de saneamento.** 3. ed. rev. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006.

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007.** Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, 8 jan. 2007. BRASIL. **Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020.** Atualiza o marco legal do saneamento básico. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, 15 jul. 2020.

BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022.** Estabelece o marco legal da geração distribuída de energia elétrica. **Diário Oficial da União:** seção 1, Brasília, DF, 7 jan. 2022. Disponível em: <https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/1348064891/lei-14300-22>. Acesso em: 20 jun. 2025.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). **Processos de tratamento de esgotos:** guia do profissional em treinamento: nível 1. Brasília: Ministério das Cidades, 2008.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Catálogo de tecnologias e empresas de biogás.** Probiogás; organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores: Elisa Thieme... [et al.]. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015. 190 p.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto.** Probiogás; organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores: Bruno Silveira... [et al.]. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015. 183 p.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Probiogás: análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás.** Probiogás; organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores: Sebastian Rosenfeldt ... [et al.]. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016. 145 p.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Probiogás: resultados do projeto de medições de biogás em reatores anaeróbios.** Probiogás; organizadores: Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autores: Carolina Cabral... [et al.]. Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016..

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). **Diagnóstico SNIS-AE 2019.** Disponível em: <https://indicadores-sinisa-2025.cidades.gov.br/dashboard?modulo=esgoto>. Acesso em: 20 jun. 2025.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). **Diagnóstico temático: serviços de água e esgoto – visão geral, 2023.** Brasília: Ministério das Cidades, 2023.

.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). **Diagnóstico temático: serviços de água e esgoto – visão geral, 2023**. Brasília: Ministério das Cidades, 2023.

BORDEAUX-RÊGO, Ricardo... [et al.]. **Viabilidade econômico-financeira de projetos**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2013. 170 p.

BRITTO, M. C.; ANDREO, V. P. **Potencial Energético do Biogás de Estação de Tratamento de Esgoto: Avaliação das Perspectivas Técnica e Econômica**. Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2017.

CABRAL, Edilson Adrião. **Avaliação do potencial energético do biogás produzido em estação de tratamento de esgoto**. 2019. 85 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) , 2019.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. (Série Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 5).

CIBIOGÁS. **Tecnologias de tratamento e purificação de biogás: o que você precisa saber**. Disponível em: <https://cibiogas.org/blog/tecnologias-de-tratamento-e-purificacao-de-biogas-o-que-voce-precisa-saber/>. Acesso em: 2 jun. 2025.

COELHO, Suani Teixeira; SOARES, Fábio Rubens; et al. **Modelos de negócios para o aproveitamento energético de resíduos agropecuários e agroindustriais**. São Paulo: Instituto de Energia e Ambiente da USP (IEE-USP), 2023.

COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DOS VALES DO SÃO FRANCISCO E DO PARNAÍBA (CODEVASF). **Manual de comunicação e organização social: esgotamento sanitário**. coord. geral: Cintia Philippi Salles; coord. técnica: Rovená Serralha Teodoro; equipe técnica: Aline Tavares Oliveira [et al.]. Brasília: CODEVASF, 2015. 61 p

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Papel da biomassa na expansão da geração de energia elétrica**: documento de apoio ao PNE 2050. 2018. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/Biomassa%20e%20Expans%C3%A3o%20de%20Energia.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE); MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME).

Balanco Energético Nacional 2024. Brasília, DF: EPE, 2024.

FLUXO. **Microturbinas para geração elétrica e cogeração.** Disponível em: <https://fluxo.si/produto/micro-turbinas-para-geracao-eletrica-e-cogeracao/>. Acesso em: 20 jun. 2025.

ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade. **Manual para aproveitamento do biogás:** volume dois, efluentes urbanos. Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de Projetos no Brasil. São Paulo, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022.** Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em: 30 nov. 2024..

INSTITUTO TRATA BRASIL. **O manual do saneamento básico.** São Paulo, 2012. Disponível em: <https://www.tratabrasil.org.br>. Acesso em: 5 jun. 2025.

JAMBAK. **Tabela de potência de geradores.** Disponível em: <https://jambak.com.br/tabela-de-potencia-de-geradores/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

JORDÃO, E. P.; PÊSSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos.** 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2005.

KAWASAKI. **Turbinas a gás.** Disponível em: https://global.kawasaki.com/br/energy/equipment/gas_turbines/outline.html. Acesso em: 20 jun. 2025.

KUNZ, Airton; STEINMETZ, Ricardo Luis Radis; AMARAL, André Cestonaro do. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Concórdia: Sbera; Embrapa Suínos e Aves, 2019. 209 p.

LIGHT. **Entenda a conta da sua empresa.** Disponível em: <https://www.light.com.br/SitePages/page-entenda-a-conta-da-sua-empresa.aspx>. Acesso em: 6 jun. 2025.

LOBATO, Livia Cristina da Silva. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico.** 2011. 184 f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011..

MENDONÇA, Sérgio Rolim; MENDONÇA, Luciana Coelho. **Sistemas sustentáveis de esgotos:** orientações técnicas para projeto e dimensionamento de redes coletoras, emissários, canais, estações elevatórias, tratamento e reuso na agricultura. São Paulo: Blucher, 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). **Biometano**. Publicado em: 13 jul. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biometano>. Acesso em: 2 fev. 2025.

MIRANDA, Joseane Borges de. **Engenharia econômica**: livro didático. 1. ed., atual. e ampl. Palhoça: UnisulVirtual, 2011. 149 p.

PEREIRA, Tomas Felipe de Souza. **Gestão de Capex**: um estudo de caso sobre a otimização da gestão financeira durante a execução de um projeto. Guaratinguetá, 2018. 41 f. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2018..

OLIVEIRA, Fabiano Sutter. **Avaliação do potencial de utilização do biogás gerado em estação de tratamento de esgoto para conversão em energia**. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2013.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Aplicações do biogás para geração de energia elétrica**. Comitê Diretor do Projeto Centro Internacional de Energias Renováveis. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2020. 94 p.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Guia prático para projetos de biogás**. Centro Internacional de Energias Renováveis. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022..

SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE BARRA MANSA (SAAE-BM). **Processo nº 5829/2018**: prevê a construção da Estação de Tratamento de Esgoto – ETE Saudade. Barra Mansa: SAAE-BM, 2018.

SILVA, Alexandre Alberto de; SOUZA, Diego Sebastian Carvalho de; BASTOS, Katia Lavatori Caetano de. **Dimensionamento hidráulico de uma estação de tratamento de esgotos – ETE**: estudo de caso – bairro de Boa Esperança em Seropédica-RJ. Iguatu, CE: Quipá Editora, 2021.

SOARES, Itânia Pinheiro et al. **Biogás e suas contribuições para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2022. 29 p. (Documentos / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-4439; 49).

SULLTEC. **Potência do gerador**. Disponível em: <https://sulltec.com.br/blog/alugar-gerador/potencia-do-gerador/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

STEMAC. **Grupos geradores a gás.** Disponível em:
<https://www.stemac.com.br/GruposGeradoresGas.aspx>. Acesso em: 20 jun. 2025.

TOKEN ENGENHARIA. **Como dimensionar um gerador de energia para a sua necessidade.** Disponível em: <https://tokenengenharia.com.br/como-dimensionar-um-gerador-de-energia-para-a-sua-necessidade/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

VON SPERLING, Marcos. **Lodos ativados**. 2. ed. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2005. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias; v. 4).

WEG. DT-5: **Características e especificações de geradores**. Revisão 2020. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h68/h68/WEG-curso-dt5-caracter-sticas-e-especifica-o-de-geradores-artigo-tecnico-portugues.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2025.

WOLTTA ENGENHARIA. **Queimadores de biogás.** Disponível em:
<https://woltta.com.br/produto/queimadores-de-biogas/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

XAVIER, Beatriz Helene. **Aspectos termodinâmicos, ecológicos e econômicos de sistemas de cogeração com motores de combustão interna operando com gás natural, biogás e gás de síntese**. 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2016.

APÊNDICE 1

Relatório Técnico - Estudo de Viabilidade Técnica

1.1 Geração de energia elétrica a partir do biogás: aplicações, armazenamento e diretrizes técnicas

A geração de energia elétrica a partir do biogás vem sendo consolidada como alternativa renovável, sustentável e tecnicamente viável. Além de aplicações em veículos, indústrias e residências, seu uso em Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) tem se destacado tanto na secagem de lodos quanto na produção direta de eletricidade. Segundo o PROBIOGÁS (2015), a viabilidade desse aproveitamento exige planejamento abrangente, desde a concepção do projeto até a seleção de tecnologias, equipamentos e métodos de conversão adequados.

Um dos pontos-chave é o armazenamento do biogás, fundamental para garantir continuidade no suprimento energético. As formas variam conforme a pressão operacional: atmosférica, baixa, alta ou superpressão, aplicáveis desde pequenas plantas até usos veiculares. Os sistemas podem empregar desde balões infláveis até tanques metálicos pressurizados, e sua escolha depende da escala da planta, da topografia e da demanda energética.

A conversão energética se baseia em diferentes ciclos termodinâmicos, como Brayton (turbinas a gás), Rankine (geração a vapor), Otto (motores de ignição por centelha) e Diesel (ignição por compressão), cada qual adequado a contextos específicos de eficiência e aplicação (EPE, 2018). Nesse cenário, destacam-se três tecnologias principais:

- Turbinas a gás: operam pelo ciclo Brayton, com ampla faixa de potência, alta eficiência e desafios relacionados à flexibilidade, emissões e confiabilidade (Cabral, 2019; Bicalho & Almeida, 2018).
- Microturbinas: apresentam maior adaptabilidade e aproveitamento de calor residual, mas ainda enfrentam barreiras de custo e baixa disseminação no Brasil (UNIDO, 2020).
- Motores ciclo Otto: os mais difundidos, com custos mais acessíveis, ampla oferta de grupos motogeradores e possibilidade de adaptação de motores diesel para biogás (ICLEI, 2010; UNIDO, 2020).

1.2 Potencial Energético do Biogás Gerado em Reatores UASB

A projeção da quantidade de energia elétrica passível de ser gerada a partir do biogás oriundo dos reatores anaeróbios do tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) é um aspecto essencial na análise da viabilidade da recuperação energética em sistemas de tratamento de esgoto. Conforme orientações do

Manual do Probiogás (2016), essa estimativa pode ser realizada utilizando uma equação específica que permite calcular o potencial energético do biogás produzido no processo.

$$P = QCH_4 \times PCI(CH_4) \times \eta_{el} \quad (6)$$

Onde:

P = Potencial de geração de energia elétrica (kWh/dia)

QCH_4 = Vazão de metano (m^3 /dia)

$PCI(CH_4)$ = Poder calorífico inferior do metano (10 kWh/ m^3)

η_{el} = Eficiência elétrica do motogerador (36%)

A vazão de metano (QCH_4) é estimada a partir do volume total de biogás gerado nos reatores, multiplicado pela concentração média de metano presente na mistura, geralmente entre 60% e 70%. Esse valor é fundamental para o cálculo do potencial energético do biogás. Considerando o poder calorífico inferior médio do biogás, estimado em cerca de 10 kWh/ m^3 segundo o Manual do Probiogás (2016), que se baseia em Moran et al. (2010, apud BRASIL, 2015), e uma eficiência média de conversão elétrica em torno de 36% (BRASIL, 2015), é possível estimar com boa precisão a energia elétrica que pode ser gerada e aproveitada na estação. Essa análise é essencial para justificar o uso do biogás como fonte renovável, contribuindo para a viabilidade econômica e ambiental do sistema ao reduzir o consumo de energia da ETE e as emissões de gases de efeito estufa. Além disso, o aproveitamento do biogás reforça a autonomia energética da ETE e contribui para metas de sustentabilidade ambiental.

1.3 Dimensionamento de gasômetro para armazenamento de biogás

Embora a Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) opere continuamente, 24 horas por dia, são necessárias paradas programadas para manutenção e ajustes técnicos ao longo do ano.

Por isso, a instalação de um gasômetro é essencial no sistema de aproveitamento energético do biogás.

Segundo Cabral (2019), o gasômetro funciona como um dispositivo de compensação, assegurando a uniformidade na vazão de biogás que alimenta os equipamentos, prevenindo variações bruscas que possam afetar o desempenho do motogerador ou causar desperdícios.

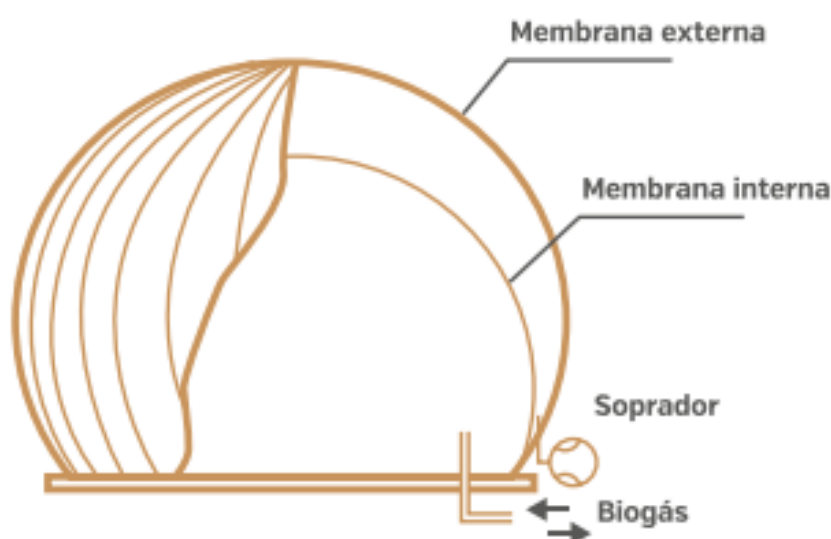
Inicialmente, o gás é direcionado a um tanque de drenagem primário, cuja função é retirar resíduos líquidos e sólidos — como condensados e partículas — da corrente gasosa.

Essa etapa é fundamental para evitar o bloqueio das tubulações e o desgaste precoce dos componentes do sistema.

Em seguida, o biogás é armazenado no gasômetro, cuja função principal é equilibrar a vazão entre a produção nos reatores anaeróbios (UASB) e o consumo do motorizador, evitando perdas por excesso de gás ou interrupções durante momentos de baixa geração.

Para este estudo, foi escolhido um gasômetro de membrana dupla, ilustrado na Figura 24, amplamente reconhecido por oferecer maior estabilidade operacional, segurança e flexibilidade no armazenamento, mesmo quando há variações na produção de biogás.

Figura 24 - Gasômetro



Fonte; Probiogas 2016

O dimensionamento do gasômetro deve ser realizado com atenção para garantir que o volume armazenado seja suficiente para acomodar a produção diária de biogás.

Além disso, o volume deve ser dimensionado de forma a minimizar a queima frequente do excesso de gás em flares e assegurar que a integridade da estrutura do equipamento não seja comprometida por esvaziamentos excessivos.

Conforme a Organização das Nações Unidas para o Desenvolvimento Industrial (2022), o volume requerido para o gasômetro pode ser calculado considerando as variações entre os períodos de geração e consumo do biogás, por meio das equações a seguir:

$$V_{\text{consumo}} = Q_{\text{consumo}} \times t_{\text{operação}} \quad (7)$$

Onde:

V_{consumo} = Volume do gasômetro para armazenamento do biogás para consumo (m^3).

Q_{consumo} = Vazão necessária para suprimento do consumo de biogás ($\text{m}^3 \cdot \text{hora}^{-1}$).

$t_{\text{operação}}$ = Tempo de operação da unidade consumidora de biogás (horas).

$$V_{\text{geração}} = Q_{\text{geração}} \times t_{\text{paralisação}} \quad (8)$$

Onde:

$V_{\text{geração}}$ = Volume do gasômetro para armazenamento do biogás gerado (m^3)

$Q_{\text{geração}}$ = Produção do biogás no biodigestor (m^3/hora)

$t_{\text{paralisação}}$ = Tempo de paralisação, sem consumo do biogás (horas).

O maior valor calculado entre as equações de consumo e geração deve ser adotado como o volume mínimo exigido para o gasômetro.

Para assegurar a confiabilidade e segurança do sistema, recomenda-se aplicar um fator de segurança de 10% a 20% sobre o volume estimado.

O dimensionamento adequado do gasômetro é fundamental não só para garantir a eficiência energética do processo, mas também para evitar emissões indesejadas de gases de efeito estufa e maximizar o uso do biogás como fonte renovável de energia.

Essa abordagem considera não apenas os aspectos técnicos relacionados à conversão do biogás em energia elétrica, mas também avalia a viabilidade econômica do projeto, levando em conta os custos operacionais, as receitas previstas e os principais indicadores financeiros pertinentes.

1.4 Cálculo da produção de biogás

Os principais parâmetros de projeto são a seguir relacionados:

Dados e Características de Projeto:

- Vazões médias de afluentes no projeto adotadas para o cálculo (L/s):

Média 125,00

Máxima (pico) 218,00

- Esgoto afluente ao tratamento:

Concentração de DBO (gO_2/m^3) 300,00

Concentração de SST (g/m^3) 375,00

Para o estudo da produção de biogás com o objetivo de aproveitamento energético, foram utilizados dados provenientes do Processo Licitatório nº 5859/2018, realizado pela SAAE de Barra Mansa, conforme descrito abaixo na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3 – Dados da produção do biogás da ETE Saudade

Item	Medida	Quantidade
Reator UASB	unidade	2,00
Volume do metano liberado no biogás	m ³ /d	716,51
Concentração de metano no biogás	%	0,75
Vazão de biogás	m ³ /d	955,35
Vazão de biogás	m ³ /h	39,81

Fonte: adaptada pelo autor – SAAE (2018)

1.5 Cálculo da produção de energia elétrica

Conforme descrito no item 4.4:

$$P = 3432,25 \text{ kWh/d}$$

Considerando o mês com 30 dias, então a produção mensal de kWh será de 103.177 kWh.

$$Pd = \frac{\text{Produção mensal}_{\text{mês}}^{\text{kWh}}}{30} \quad (18)$$

O consumo horário será calculado utilizando a equação a seguir

$$Cd = \text{Produção} \frac{\text{diária}}{24h} \quad (19)$$

O consumo horário calculado foi de 143,30kWh.

Com base em uma pesquisa realizada em julho de 2025 junto a três empresas fornecedoras de grupos moto-geradores de energia elétrica (SULTEC, JAMBACK e TOKENGENHARIA), verificou-se que a potência dos geradores é normalmente especificada em kVA (quilovolt-ampères), enquanto o consumo dos equipamentos elétricos é comumente informado em kW (quilowatts). Para realizar a conversão de kW para kVA, é essencial considerar o fator de potência (FP), que indica o grau de aproveitamento da energia elétrica pelo sistema. Esse fator, em aplicações residenciais ou

A conversão é feita por meio da seguinte fórmula:

$$kVA = \frac{kW}{FP} \quad (20)$$

Onde:

kVA = Potência do gerador em kVA

kW = Potência do gerador em kW

FP = Fator de potência

O dimensionamento do grupo moto-gerador de energia elétrica para atender à demanda prevista foi feito considerando um fator de potência padrão de 0,8, valor comumente utilizado em especificações de geradores. Com base nesse parâmetro, a potência necessária foi calculada em 180 kVA.

Para a definição da capacidade do gerador, considerou-se sua operação em regime contínuo, ou seja, em funcionamento durante 24 horas por dia. Com o objetivo de garantir maior confiabilidade ao sistema, facilitar os procedimentos de manutenção e aumentar a disponibilidade dos equipamentos, optou-se pela instalação de dois grupos moto-geradores.

Cada um operaria em turnos alternados de 12 horas diárias, assegurando a redundância operacional do sistema.

O custo estimado do gerador foi calculado com base nos valores apresentados por Cabral (2019), atualizados monetariamente por meio da Calculadora do Cidadão, ferramenta disponibilizada pelo Banco Central do Brasil (ver anexo).

O valor resultante foi de R\$ 317.960,00 (trezentos e dezessete mil, novecentos e sessenta reais), sendo arredondado para R\$ 318.000,00 (trezentos e dezoito mil reais) para fins de cálculo do investimento inicial na implantação da unidade.

APÊNDICE 2

2. Relatório Técnico – Plano Financeiro

2.1 Cálculo dos custos de investimento – Capex

Para a estimativa dos custos de implantação do sistema de geração de energia elétrica (CAPEX), adotou-se a metodologia proposta pelo Probiogás (2016), que serviu de base para a elaboração da Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo do custo de investimento – Capex, ETE - Saudade

Equipamento	Custo - Real R\$
Elaboração do projeto	17.035,71
Unidade Motor-Gerador	636.000,00
Sistema de Tratamento de Biogás	39.750,00
Gasômetro	62.464,29
Sistema de captação de biogás	28.392,86
Sistema de transporte de biogás	17.035,71
Instalações Elétrica	45.428,57
Medição de composição de biogás	22.714,29
Sistema de queima c/queimador aberto	17.035,71
Total	885.857,14

Fonte: Adaptada pelo autor - Probiogás (2017)

2.2 Cálculo dos custos de operação e manutenção – OPEX

Nos diferentes cenários analisados, os custos operacionais considerados referem-se, essencialmente, à mão de obra e aos serviços de manutenção preventiva e corretiva. De acordo com Cabral (2019), citado por Souza et al. (2004), os gastos anuais com operação e manutenção correspondem, em média, a 4% do valor total investido na unidade. Com base nessa proporção, o custo anual estimado para operação e manutenção é de R\$ 22.714,28 (vinte e dois mil, setecentos e quatorze reais e vinte e oito centavos).

2.3 Análise Financeira

Este tópico tem como objetivo analisar a viabilidade econômica da implementação de um sistema de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs).

A análise está centrada na potencial redução dos custos operacionais e na melhoria da eficiência no uso dos recursos energéticos disponíveis.

2.4 Custo com a produção de eletricidade

De acordo com a metodologia descrita por Cabral (2019), o cálculo do custo de geração de eletricidade baseia-se na amortização do investimento total ao longo da vida útil da unidade geradora, por meio da aplicação do fator de anuidade. Esse fator permite transformar o valor investido em parcelas anuais constantes, levando em consideração uma taxa de juros composta, sendo fundamental para estimar o custo anualizado da energia gerada.

Os cálculos seguem as equações apresentadas no item 4.6 deste trabalho, utilizando os fundamentos da engenharia econômica para determinar o custo nivelado da eletricidade (LCOE).

Para a análise, serão consideradas três taxas de juros distintas — 15%, 12% e 8% — representando diferentes cenários de custo de capital.

A Tabela 5, a seguir, apresenta os fatores de anuidade correspondentes a cada uma dessas taxas, que serão aplicados na amortização do investimento e na composição do fluxo de caixa anual da planta de geração.

Tabela 5 – Custo com a produção de eletricidade – ETE Saudade

Período	Custo 15%	Custo 12%	Custo 8%
Anos	R\$/kWh	R\$/kWh	R\$/kWh
1	0,85	0,83	0,80
2	0,47	0,45	0,43
3	0,34	0,33	0,31
4	0,28	0,26	0,24
5	0,24	0,23	0,21
6	0,22	0,20	0,18
7	0,20	0,19	0,17
8	0,19	0,17	0,15
9	0,18	0,16	0,14
10	0,17	0,16	0,14
11	0,17	0,15	0,13
12	0,16	0,14	0,12
13	0,16	0,14	0,12
14	0,15	0,14	0,12
15	0,15	0,13	0,11
16	0,15	0,13	0,11
17	0,15	0,13	0,11
18	0,15	0,13	0,10
19	0,14	0,13	0,10
20	0,14	0,12	0,10

Fonte; adaptada de Cabral, 2019

2.5 Receita com a produção de eletricidade

Seguindo a metodologia indicada por Cabral (2019), a receita gerada pela venda da energia elétrica produzida a partir do biogás foi calculada conforme a equação 14. A receita anual (R\$/ano), mostrada na

Tabela 6, representa o valor obtido a partir da tarifa nas modalidades Horo - sazonal Verde (Figura 26) e Horo - sazonal Azul (Figura 27).

Essa receita corresponde à diferença entre a tarifa praticada pela distribuidora local e o custo de produção da eletricidade ao longo da vida útil da unidade, estimada em 20 anos.

As tarifas de energia consideradas para o cálculo foram extraídas das tarifas aplicadas pela concessionária Light durante o ano de 2025, contemplando as variações nos períodos de ponta e fora de ponta.

O valor médio ponderado, utilizado na análise, foi determinado pela equação 13, cujos resultados estão apresentados na Tabela 6

Já o custo de produção da eletricidade foi estimado segundo os critérios de amortização descritos anteriormente, conforme apresentado na Tabela 5.

Dessa forma, a receita líquida anual é calculada pela diferença entre a tarifa média ponderada e o custo nivelado de geração da energia, refletindo o retorno financeiro potencial da injeção da eletricidade na rede de distribuição. A Figura 26 ilustra a tarifa horo-sazonal verde praticada pela concessionária Light.

Figura 26 – Tarifas de média tensão de energia elétrica - Tarifa Verde

TARIFA DE MÉDIA TENSÃO - ESTRUTURA HORO-SAZONAL VERDE																
Nível de Tensão	Demanda R\$/kW			Consumo R\$/MWh						Demanda de Ultrapassagem R\$/kW			Demandade Ultrapassagem R\$/kW			
	TUSD + TE	TUSD	TE	Ponta			Fora Ponta									
				TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	
A4 (2,3 a 25kV)	22,78	22,78	0,00	1.475,84	945,56	530,28	508,59	161,87	346,72	45,56	45,56	0,00	45,56	45,56	0,00	
AS (Subterrâneo)	19,61	19,61	0,00	2.978,85	2.447,45	531,40	616,88	269,04	347,84	39,22	39,22	0,00	39,22	39,22	0,00	

Fonte: adaptada pelo autor, Light, acessado pelo <https://www.light.com.br/SitePages/page-entenda-a-conta-da-sua-empresa.aspx>,2025

Segundo a concessionária LIGHT (2025), a tarifa verde é destinada a consumidores com fornecimento em tensão inferior a 69 kV.

Essa modalidade tarifária estabelece dois preços distintos para o consumo de energia (em R\$/MWh), que variam conforme o horário de utilização — classificados como Horário de Ponta e Fora de Ponta.

Além disso, existe uma cobrança fixa relacionada à demanda de potência contratada, independente do consumo efetivo. Esse modelo tarifário é particularmente vantajoso para consumidores que conseguem ajustar ou reduzir seu consumo durante o Horário de Ponta.

A Figura 27 apresenta os valores praticados pela Light para a tarifa azul.

Figura 27 – Tarifas de média tensão de energia elétrica - Tarifa Azul

TARIFAS DE MÉDIA TENSÃO / ALTA TENSÃO - ESTRUTURA HORO-SAZONAL AZUL																					
Nível de Tensão	Demanda R\$/kW						Consumo R\$/MWh						Demanda de Ultrapassagem R\$/kW								
	Ponta			Fora Ponta			Ponta			Fora Ponta						Fora Ponta			Fora Ponta		
	TUSD+TE	TUSD	TE	TUSD+TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE	TUSD + TE	TUSD	TE
A2 (88 a 138kV)	24,75	24,75	0,00	16,15	16,15	0,00	631,16	102,44	528,72	447,59	102,44	345,15	49,50	49,50	0,00	32,30	32,30	0,00	32,30	32,30	0,00
A4 (2,3 a 25kV)	32,37	32,37	0,00	22,78	22,78	0,00	692,15	161,87	530,28	508,59	161,87	346,72	64,74	64,74	0,00	45,56	45,56	0,00	45,56	45,56	0,00
AS (Subterrâneo)	89,97	89,97	0,00	19,61	19,61	0,00	800,44	269,04	531,40	616,88	269,04	347,84	179,94	179,94	0,00	39,22	39,22	0,00	39,22	39,22	0,00

Fonte: adaptada pelo autor, Light, acessado pelo <https://www.light.com.br/SitePages/page-entenda-a-conta-da-sua-empresa.aspx>,2025

Assim como a tarifa verde, a tarifa azul é obrigatória para consumidores com fornecimento em tensões iguais ou superiores a 69 kV, sendo opcional para aqueles com tensões inferiores.

Ambas as modalidades tarifárias consideram o consumo de energia e a demanda de potência, aplicando valores diferenciados para cada um.

No caso da demanda, a cobrança varia entre os períodos de ponta e fora de ponta. Já para o consumo de energia, são adotadas tarifas distintas conforme o horário de utilização.

Tabela 6 - Receita -Tarifa Horosazonal Verde e Azul

Receita -Tarifa Horosazonal Verde			Receita -Tarifa Horosazonal Azul		
Taxa 15%	Taxa 12%	Taxa 8%	Taxa 15%	Taxa 12%	Taxa 8%
-274778,09	-248202,38	-212768,09	-396065,877	-369490,163	-334055,88
199052,47	219797,62	247196,19	77764,686	98509,836	125908,41
355972,60	375131,90	400215,36	234684,815	253844,117	278927,58
433672,55	452302,94	476498,92	312384,772	331015,158	355211,13
479692,65	498212,23	522088,98	358404,872	376924,442	400801,20
509881,47	528494,38	552333,09	388593,684	407206,595	431045,30
531032,67	549850,61	573808,91	409744,890	428562,823	452521,13
546544,27	565632,06	589805,40	425256,491	444344,275	468517,62
558304,98	577700,93	602149,86	437017,197	456413,151	480862,08
567448,75	587174,93	611938,78	446160,972	465887,149	490651,00
574697,79	594765,63	619869,99	453410,011	473477,846	498582,21
580534,00	600947,67	626408,79	459246,221	479659,886	505121,01
585291,34	606049,86	631877,37	464003,557	484762,079	510589,59
589208,57	610307,25	636505,93	467920,788	489019,464	515218,15
592460,94	613892,32	640463,33	471173,157	492604,533	519175,55
595179,96	616934,55	643876,25	473892,173	495646,763	522588,47
597466,20	619533,02	646841,60	476178,418	498245,239	525553,82
599397,88	621764,86	649434,80	478110,096	500477,082	528147,02
601036,66	623690,99	651715,41	479748,876	502403,207	530427,63
602431,78	625360,14	653731,11	481143,995	504072,361	532443,33

Fonte: Elaboração própria.

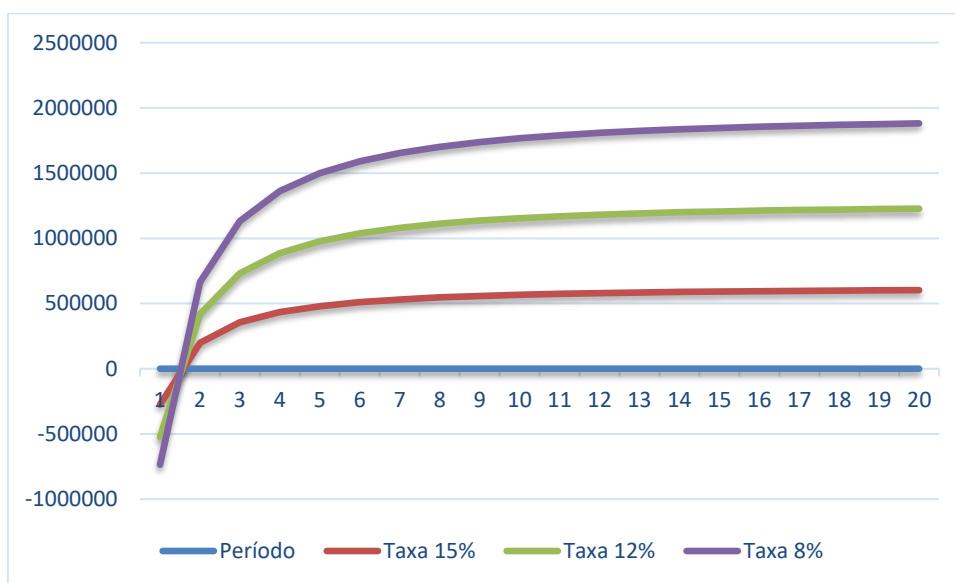
2.6 Payback

A avaliação do Payback foi realizada por meio da análise do fluxo de caixa anual, utilizando os dados apresentados nas Tabelas 5 e 6 como base para os cálculos. Esse método permitiu estimar o período necessário para que o investimento inicial fosse completamente recuperado por meio da receita gerada pela venda da eletricidade produzida a partir do biogás gerado na estação de tratamento de esgoto.

Durante a análise, foram considerados os custos de implantação, operação e manutenção, bem como as receitas provenientes da comercialização da energia elétrica, permitindo uma avaliação realista da viabilidade financeira do projeto.

A Figura 28 apresenta os resultados obtidos no estudo do payback, evidenciando o tempo estimado para o retorno do investimento e contribuindo para a tomada de decisão quanto à implementação do sistema.

Figura 28 – Projeção do Payback – ETE Saudade



Fonte; Elaboração própria

Os resultados da análise indicam que, à medida que o sistema opera, os custos relacionados à geração de eletricidade a partir do biogás tendem a reduzir progressivamente. Essa diminuição é ainda mais acentuada quando são consideradas diferentes taxas de amortização — 15%, 12% e 8% — que impactam diretamente o prazo para o retorno do investimento inicial.

No caso específico da futura Estação de Tratamento de Esgoto Saudade, avaliou-se o potencial de produção de biogás e sua utilização na geração de energia elétrica.

A projeção aponta que o ponto de payback — momento em que o custo da eletricidade gerada internamente se torna inferior à tarifa cobrada pela concessionária local — será atingido após aproximadamente 1 ano e 7 meses de operação contínua.

Essa estimativa demonstra o potencial retorno financeiro associado ao aproveitamento energético do biogás, reforçando a viabilidade econômica e ambiental do projeto.

Além disso, evidencia o papel estratégico dessa fonte renovável na redução dos custos operacionais em sistemas de saneamento, tornando essa alternativa especialmente atraente sob a ótica da sustentabilidade e eficiência energética.

2.7 Valor Presente Líquido – VPL

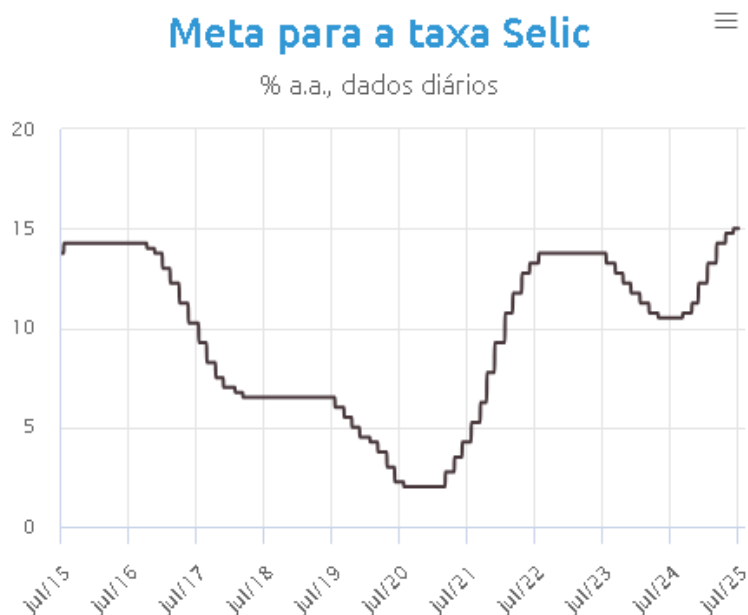
Para o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), foi empregada a Equação 17. A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) adotada baseou-se na taxa Selic, que é a taxa básica de juros da economia brasileira e influencia diversas outras taxas, como empréstimos, financiamentos e aplicações financeiras.

A taxa Selic é o principal instrumento de política monetária do Banco Central (BC) para o controle da inflação.

Sobre essa base, foram adicionados o índice de inflação projetado e um percentual extra para cobrir as incertezas e riscos relacionados às variações do mercado.

Dessa forma, a taxa utilizada para a TMA foi fixada em 15%, conforme os dados apresentados pelo Banco Central, ilustrados na Figura 29 a seguir.

Figura 29 – Taxa SELIC



Fonte: Banco Central, acessado <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>, 2025

A Tabela 7 apresenta a análise detalhada do fluxo de caixa anual da planta de geração de energia, expressa em R\$/ano.

A partir dos dados avaliados, é possível observar que, para ambas as propostas analisadas, o Valor Presente Líquido (VPL) se torna positivo em um intervalo relativamente curto de tempo, indicando que o investimento recupera seu valor inicial rapidamente.

Essa condição positiva do VPL evidencia a viabilidade econômica do projeto, sinalizando que a planta tem potencial para gerar retornos financeiros consistentes ao longo de sua vida útil.

Além disso, a análise reforça a eficiência da aplicação dos recursos, contribuindo para a tomada de decisões estratégicas no planejamento e implementação do sistema de geração de energia a partir do biogás.

Portanto, os resultados obtidos confirmam a atratividade econômica do projeto, destacando sua relevância como alternativa sustentável e financeiramente viável.

Tabela 7 – Análise de fluxo de caixa por ano – ETE Saudade

Análise de fluxo de caixa por ano (R\$/ano)			
Período/ano	taxa 15%	Taxa 12%	Taxa 8%
0	-885857,14	-885857,14	-885857,14
1	-238935,24	-221606,97	-197005,11
2	323605,55	371473,54	440820,84
3	812771,45	901009,71	1031400,42
4	1238133,11	1373809,86	1578233,37
5	1608012,80	1795952,85	2084560,18
6	1929647,32	2172866,23	2553381,29
7	2209329,52	2509396,04	2987474,92
8	2452531,42	2809869,08	3389413,46
9	2664011,34	3078148,59	3761578,78
10	2847906,92	3317683,86	4106176,29
11	3007816,12	3531554,63	4425248,07
12	3146867,60	3722510,69	4720684,89
13	3267781,93	3893007,16	4994237,51
14	3372924,83	4045236,15	5247526,97
15	3464353,43	4181154,90	5482054,25
16	3543856,56	4302510,92	5699209,14
17	3612989,72	4410864,51	5900278,48
18	3673105,52	4507608,79	6086453,79
19	3725380,12	4593987,61	6258838,35
20	3770836,29	4671111,56	6418453,67

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao considerar toda a vida útil da planta de geração de energia a partir do biogás, os resultados obtidos para o Valor Presente Líquido (VPL) indicam que o investimento é economicamente viável, apresentando elevado potencial de retorno.

O VPL positivo, identificado ainda nos primeiros anos de operação, demonstra que os benefícios financeiros superam os custos ao longo do tempo, o que evidencia uma excelente atratividade econômica.

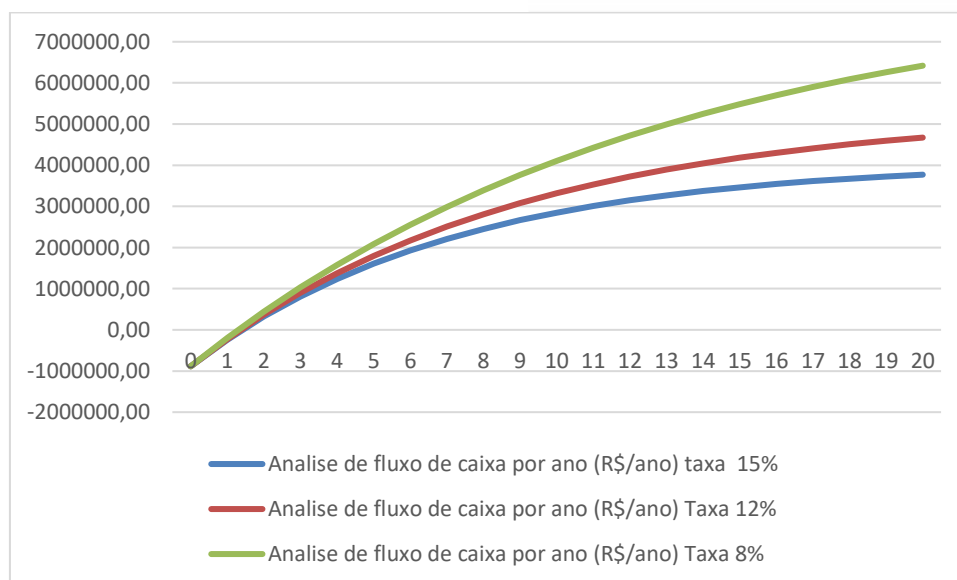
Além disso, os resultados reforçam a robustez da proposta, mesmo em cenários conservadores, nos quais as projeções são mais cautelosas em relação às variáveis de mercado e à geração de receita.

Isso mostra que o projeto não apenas se sustenta financeiramente, como também se configura como uma alternativa estratégica e eficiente para a valorização energética de resíduos, especialmente no contexto de estações de tratamento de esgoto.

A Tabela 7 apresenta os dados detalhados da análise de fluxo de caixa ano a ano (R\$/ano), possibilitando a visualização clara da evolução dos ganhos ao longo do tempo.

Complementarmente, a Figura 30 ilustra graficamente esses resultados, permitindo uma interpretação visual do desempenho financeiro do projeto, reforçando as conclusões obtidas por meio dos cálculos apresentados.

Figura 30 – Análise de fluxo de caixa por ano- ETE Saudade



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.8 Taxa Interna de Retorno –TIR

Conforme demonstrado na Tabela 8, a Taxa Interna de Retorno (TIR) do investimento apresentou um comportamento crescente ao longo do tempo, atingindo seu ápice no décimo ano de operação.

A análise revela que, para os três cenários considerados — com taxas de amortização de 15%, 12% e 8% — a TIR alcança valores expressivos, consolidando a atratividade financeira do projeto.

Especificamente, no período de 10 anos, observou-se uma TIR de 69% para os cenários com taxas de 15% e 8%, e de 63% para o cenário com taxa de 12%, evidenciando um desempenho econômico robusto. A partir do 15º ano, os valores da TIR estabilizam-se, mantendo-se constantes até o 20º ano de análise.

Esse comportamento indica que o retorno financeiro se consolida ainda na primeira metade da vida útil da planta, contribuindo para a redução do risco do investimento.

O estudo da TIR confirma, portanto, a elevada rentabilidade do projeto, uma vez que todos os valores obtidos superam significativamente a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) considerada na análise.

Tabela 8 – Análise da Taxa de Interna de Retorno do Investimento – ETE Saudade

Taxa Interna de retorno - período de 20 anos				
Período	TIR 15%	TIR 12%	TIR 8%	
5	53%	46%	53%	
10	69%	63%	69%	
15	70%	64%	70%	
20	70%	64%	70%	

Fonte: Elaborado pelo autor

Esses resultados, aliados ao VPL positivo, reforçam a viabilidade econômica da implantação do sistema de geração de energia a partir do biogás em estações de tratamento de esgoto.

ANEXOS

Capítulos de livros publicados

Guimaraes. F.L.A; Sandro Pereira Ribeiro . A RIQUEZA OCULTA SOB A TERRA: O POTENCIAL DO ESGOTAMENTO SANITÁRIO EM UM MUNICÍPIO DO MÉDIO PARAÍBA. In: Dr. Sandro Ribeiro. (Org.). Integrando Práticas Educacionais, Ciências Ambientais e Engenharia para o Desenvolvimento Sustentável. 1ed.Vassouras - RJ: Universidade de Vassouras, 2024, v. 1, p. 5-287.

Apresentações de Trabalho

Guimaraes. F.L.A; Sandro Pereira Ribeiro . Aproveitamento Do Biogás Oriundo Do Lodo De Estação De Tratamento de Esgoto Para Geração De Energia. 2024. (Apresentação de Trabalho/Simpósio).

Apresentações de Trabalho

Guimaraes. F.L.A; Sandro Pereira Ribeiro . Aproveitamento Do Biogás Oriundo Do Lodo De Estação De Tratamento de Esgoto Para Geração De Energia. 2024. (Apresentação de Trabalho/Simpósio).
10.48141/SSCON_35_2024.PDF